

электроники

А. МЕДВЕДЕВ

Печатные платы.
Конструкции
и материалы



ТЕХНОСФЕРА

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ для ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ



PTS ИНЖИНИРИНГ - RTS ENGINEERING - PTS ИНЖИНИРИНГ

Мы выполняем следующие работы:

I. Инженерно-техническая:

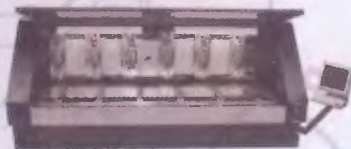
- консультация по подбору отдельных видов оборудования для любых этапов технологического процесса производства ПП;
- разработка комплексного технического проекта производства ПП под ваши производственные площади и ваши производственные задачи;
- экспертиза имеющегося производства печатных плат, подготовка предложений по его реконструкции

II. Поставка оборудования и материалов:

- оборудование под любую технологическую операцию производства ПП на различных условиях доставки;
- уникальные проверочные и ремонтные станции, бесконтактные цифровые, автоматические измерительные системы;
- универсальный программный продукт UCAM;
- пресс-формы и разделительные плиты для изготовления МПП;
- запасные части;
- расходные и вспомогательные материалы;
- сверла и фрезы для производства печатных плат.

III. Сервис:

- пуско-наладка поставляемого оборудования;
- гарантийное и послегарантийное сервисное обслуживание;
- техническая экспертиза состояния вашего оборудования;
- ремонт оборудования;
- модернизация оборудования;
- электроконтроль печатных плат на различных этапах производства;
- обучение вашего персонала работе и обслуживанию поставленного нами оборудования.



ООО "РТС ИНЖИНИРИНГ"

Web site: <http://www.rts-engineering.ru>

Тел.: (095) 964-4748, 964-9670
Факс.: (095) 964-4739
E-mail: main@rts-engineering.ru



М И Р электроники

А. МЕДВЕДЕВ

Печатные платы.
Конструкции
и материалы

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2005

А. Медведев

Печатные платы. Конструкции и материалы

Москва:

Техносфера, 2005. — 304с. ISBN 5-94836-026-1

Электроника — наиболее быстро развивающаяся область науки и техники, одно поколение сменяет другое каждые три-пять лет. Меняются и технологии печатных плат, сборки и монтажа компонентов, составляющих основу печатного монтажа. Базовые технологии печатных плат обретают новыми приемами и операциями, расширяются их возможности за счет использования прецизионного оборудования, более качественных материалов.

В книге известного российского специалиста, д.т.н., профессора А.М. Медведева, описаны схемы процессов, системы совмещений, технологии формирования топологического рисунка. Монография предназначена как для технологов, работающих на производстве печатных плат, так и для конструкторов. Положительно скажется ее прочтение и на уровне управления производством. Преподаватели технических университетов и колледжей могут рекомендовать ее в качестве учебного пособия по курсу «Конструирование и технология производства электронной аппаратуры».

В следующей книге этой серии А.М. Медведевым будут рассмотрены технологические операции, материалы, принципы тестирования и технологического обеспечения надежности межсоединений.

© 2005, А. М. Медведев
© 2005, ЗАО «РИЦ «Техносфера»
оригинал-макет, оформление.

ISBN 5-94836-026-1

РЕЗОНИТ
www.rezonit.ru



124460 Москва
Зеленоград, а/я 31
(095) 777-8080
(095) 730-5000
order@rezonit.ru

Санкт-Петербург
ул. Маяковского, 45,
офис 211
(812) 115-8818
(812) 118-1933
spb@rezonit.ru

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
СРОЧНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ
МОНТАЖ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ (ВКЛЮЧАЯ BGA)
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРАФАРЕТОВ ДЛЯ SMT-МОНТАЖА**

Сеть региональных представительств. Возможна ДОСТАВКА в любой регион страны.

Содержание

Глава 1

Конструкции и схемы изготовления печатных плат	19
1.1. Почему «печатная плата»?	19
1.2. История	20
1.3. Классификация конструкций печатных плат	22
1.4. Методы изготовления печатных плат	25
1.4.1. Субтрактивные методы	25
1.4.1.1. Химический метод	26
1.4.1.2. Механическое формирование зазоров (оконтуривание проводников) ...	27
1.4.1.3. Лазерное гравирование	29
1.4.2. Аддитивные методы	29
1.4.2.1. Фотоаддитивный процесс	30
1.4.2.2. Аддитивный процесс	31
1.4.2.3. Нанесение токопроводящих красок или металлонаполненных паст	32
1.4.2.4. Горячая запрессовка металлического порошка (тиснение)	35
1.4.2.5. Штампование схем	35
1.4.2.6. Метод переноса	36
1.4.2.7. Общая оценка аддитивных методов	37
1.4.3. Полуаддитивные методы	38
1.4.3.1. Классический полуаддитивный метод	39
1.4.3.2. Аддитивный метод с дифференциальным травлением	41
1.4.3.3. Рельефные платы	41
1.4.4. Комбинированные методы	43
1.4.4.1. Комбинированный негативный метод	43
1.4.4.2. Комбинированный позитивный метод	44
1.4.4.3. Тентинг-метод	47
1.4.5. Выбор методов изготовления печатных плат	48
1.5. Методы изготовления многослойных печатных плат	52
1.5.1. Введение	52
1.5.2. Метод попарного прессования	52

КОНТРАКТ ЭЛЕКТРОНИКА

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АЛЬЯНС



ОТ ИДЕИ

ДО СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

ДИЗАЙН, РЕДИЗАЙН

- Разработка схемотехнических решений
- Проектирование печатных плат
- Проектирование корпусов

КОМПЛЕКТАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Активные компоненты
- Пассивные компоненты
- Электромеханические компоненты

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

- Односторонние
- Двухсторонние
- Многослойные (включая платы с "глухими" и скрытыми переходами)
- Гибкие платы
- Гибкие платы под SMT-монтаж
- Комбинированные гибко-жесткие платы
- Платы с алюминизированными подложками
- СВЧ-платы с фторопластовыми и другими диэлектрическими материалами

МОНТАЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

КОРПУСИРОВАНИЕ

- Изготовление трафаретов
- Высокопроизводительные автоматические SMD-линии
- Автоматические линии оптического контроля
- Рентген-контроль
- Монтаж с применением машин пайки волной

ИСПЫТАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ

- Металлическое – типовое и под заказ
- Пластиковое – типовое и под заказ
- Проектирование и изготовление пресс-форм

УПАКОВКА, ЛОГИСТИКА

115114, Москва, Дербеневская ул., 1/2, корп. 1, подъезд 29, офис 204
Тел.: (095) 741-7704. Факс: (095) 929-9351. E-mail: info@contract.ru
www.contraclectronica.ru

1.5.3. Метод открытых контактных площадок и выступающих выводов	52
1.5.4. Метод послойного наращивания	56
1.5.5. Метод металлизации сквозных отверстий	58
1.5.6. МПП с микропереходами	66
1.5.6.1. Обоснование необходимости	66
1.5.6.2. МПП со скрытыми микропереходами на наружных слоях	67
1.5.6.3. Комбинация методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания	69
1.5.7. Гибкие печатные платы	69
1.5.8. Выбор методов изготовления печатных плат	71

Глава 2

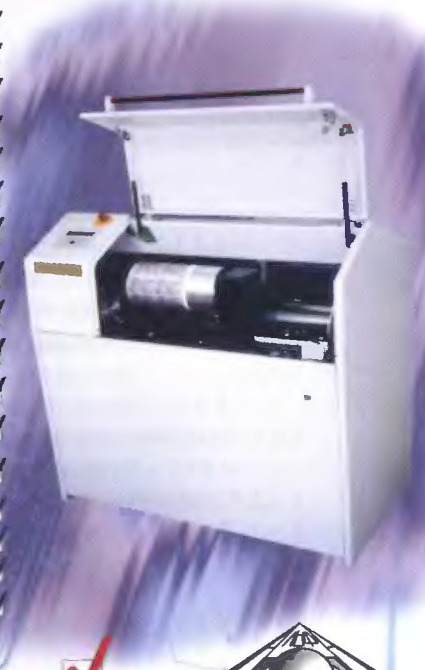
Элементы конструирования печатных плат	73
2.1. Корпуса микросхем	74
2.1.1. Конструкции корпусов микросхем	74
2.1.2. Непосредственный монтаж кристаллов на подложку	76
2.1.3. Микрокорпуса (CSP)	79
2.1.4. Количество выводов и степень интеграции микросхем	80
2.2. Координатная сетка	82
2.3. Элементы проводящего рисунка	23
2.3.1. Печатные проводники	23
2.3.2. Металлизированные отверстия	84
2.3.3. Монтажные контактные площадки. Финишные покрытия.	86
2.3.4. Контактные покрытия	88
2.3.5. Топология токопроводящего рисунка	93
2.3.6. Избирательная лаковая защита (паяльная маска)	95
2.3.7. Деформация печатных плат	96
2.4. Плотность межсоединений	98
2.4.1. Методы увеличения плотности монтажа ПП	98
2.4.2. Влияние размеров контактных площадок на плотность трассировки	98
2.4.3. Уменьшение ширины проводников и зазоров	101



ВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ВАШИХ ПРОБЛЕМ – ТЕПЕРЬ 10160 dpi!



- РАСТРОВЫЙ МЕТОД ЗАПИСИ ✓
- КОНСТРУКЦИЯ "ВНЕШНИЙ БАРАБАН" ✓
- ПОЛНОЕ ОТСУТСТВИЕ ХИМИИ ✓
- ШИРОКИЙ ДИАПАЗОН ФОРМАТОВ ✓
- КЛАСС ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ – ДО 5-ГО ✓
- СОВРЕМЕННЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР ✓
- КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ✓
- ЕДИНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ✓
- ПРОГРАММНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ✓
- ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА ПРОВОДНИКОВ И ПЛОЩАДОК ✓
- РАБОТА ПРИ ДНЕВНОМ ОСВЕЩЕНИИ ✓
- ПОДДЕРЖКА КЛИЕНТОВ ✓
- ОПЫТ РАБОТЫ БОЛЕЕ 170 СИСТЕМ В РОССИИ И ЗАРУБЕЖОМ ✓
- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЧИСТОТА ✓
- УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ✓
- РАЗРЕШЕНИЕ – 508...10160 dpi ✓
- ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ✓



НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



- РАЗРЕШЕНИЕ ДО 10160 dpi ✓
- ЗАПИСЬ МИКРОСБОРОК ✓
- ПЛЕНКА 175 МКМ ✓



АЛЬФА

125480 Москва, а/я 45,
Т./ф.: (095) 494-0500, 9588
E-mail: sales@alphalaser.ru
http://www.alphalaser.ru

2.4.4. Увеличение количества слоев	103
2.4.5. Оценка плотности межсоединений	104
2.5. Быстродействие	107
2.5.1. Задержка сигналов	107
2.5.2. Погонная емкость	108
2.5.3. Волновое сопротивление	109
2.6. Энергопотребление	111
2.6.1. Цепи питания	111
2.6.2. Сопротивление цепей	111
2.6.3. Токнесущая способность проводников	113
2.7. Элементы кондуктивного теплоотвода	117
2.8. Себестоимость	

Глава 3

Базовые материалы	121
3.1. Общие понятия.	121
3.2. Фольги	122
3.2.1. Электролитическая фольга (ED foil – electrodeposited copper foil).	122
3.2.1.1. Шероховатость.	123
3.2.1.2. Покрывания, создающие термический барьер.	123
3.2.1.3. Пассивационные и антиоксидантные покрытия.	124
3.2.1.4. Аппретирование.	124
3.2.1. Фольги с обработкой обратной стороны (RTF – Reverse-treated foil).	124
3.2.2. Отожженная катаная фольга.	125
3.2.3. Другие типы фольг	125
3.2.3.1. Фольга с двусторонней обработкой (DTF – Double-Treated Copper Foil)	125
3.2.3.2. Тонкомерная фольга	126
3.2.3.3. Резистивные фольги	127
3.2.3.4. Фольги из других металлов	127
3.3. Связующие	127
3.3.1. Общие сведения о связующих	127
3.3.1.1. Полимеры	127
3.3.1.2. Строение молекул полимеров	129

Комплексные решения для производства печатных плат и выполнения гальванических покрытий

www.nmaee.ru

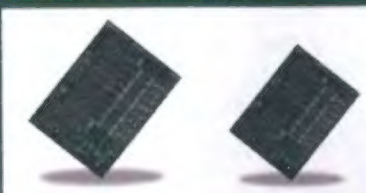


3.3.1.3. Стадии отверждения полимеров	130
3.3.1.4. Общие свойства полимеров	131
3.3.2. Температурные фазовые переходы в полимерах	132
3.3.3. Эпоксидные смолы	133
3.3.3.1. Общие свойства	133
3.3.3.2. Диановые (дифункциональные) эпоксидные смолы	134
3.3.3.3. Тетра- и многофункциональные эпоксидные смолы	135
3.3.4. Другие связующие	137
3.3.4.1. Эпоксидные композиции	137
3.3.4.2. Бисмалеимид Триазин (BT – Bismaleimide Triazine)	137
3.3.4.3. Цианатный полиэфир	138
3.3.4.4. Полиимиды	138
3.3.4.5. Полибензимидазолы и полибензоксазолы	139
3.3.4.6. Полисульфоны	139

3.3.4.7. Сложные полиэфиры	139
3.3.4.8. Ненасыщенные олигоэфиры (полиэфиры)	140
3.3.4.9. Простые полиэфиры	141
3.3.4.10. Политетрафторэтилен	141
3.3.4.11. Фенолоальдегидные смолы	142
3.4. Армирующие наполнители композиционных материалов	142
3.4.1. Силикатные наполнители	143
3.4.1.1. Составы электротехнических стекол	143
3.4.1.2. Стекланные волокна	144
3.4.1.3. Стекланные ткани	145
3.4.2. Другие наполнители	147
3.4.2.1. Стекланный шпон	147
3.4.2.2. Арамидные волокна	147
3.4.2.3. Бумага	147
3.4.3. Простые наполнители	148
3.5. Технология изготовления материалов диэлектрического основания.	148
3.6. Основные типы фольгированных материалов	153
3.6.1. Сортамент композиционных материалов для диэлектрических материалов	153
3.6.2. Распространенные типы фольгированных материалов	156
3.6.2.1. Гетинакс (ГФ).	156
3.6.2.2. Эпоксидный гетинакс (FR-3)	156
3.6.2.3. Эпоксидный стеклотекстолит (СФ, G-10).	156
3.6.2.4. Нагревостойкий эпоксидный стеклотекстолит (СФН).	156
3.6.2.5. Нагревостойкие огнестойкие эпоксидные стеклотекстолиты (FR).	157
3.6.2.6. Полиэфирные текстолиты	157
3.6.2.7. Полиимид и цианатный полиэфир, армированные нагревостойкими тка	157
3.6.2.8. Комбинации материалов	158
3.6.2.9. Склеивающие материалы	158
3.7. Свойства фольгированных материалов	159



ООО «Печатные платы»




РАЗРАБОТКА

- PCAD
- Gerber
- Drcad
- Protal

ИЗГОТОВЛЕНИЕ

- 2-6 слоев
- ДПП - 3 дня
- МПП - 5 дней
- покрытие ламелей
- серийное
- малкосерийное
- срочное
- прототипы

СБОРКА

- поверхностный монтаж
- монтаж в отверстия
- смешанный монтаж

127055
г. Москва
ул. Сущевская
дом 21
тел./факс : (095) 787-65-01
(095) 787-65-02
(095) 787-65-03
www.pcbpro.ru
ppalpcb@sovintel.ru

3.7.1. Физико-механические свойства	159
3.7.1.1. Подготовка образцов к испытаниям	159
3.7.1.2. Механическая прочность	160
3.7.1.3. Релаксация	161
3.7.1.4. Плотность	161
3.7.1.5. Водопоглощение, влагостойкость	162
3.7.1.5. Температурный коэффициент линейного расширения	163
3.7.1.6. Теплопроводность материала основания	164
3.7.1.7. Огнестойкость (горючесть).	164
3.7.1.8. Коробление.	165
3.7.1.9. Нагревостойкость.	166
3.8. Прочность сцепления фольги с диэлектриком	167
3.8.1. Методические вопросы	167
3.8.1.1. Способы отрыва фольги	167
3.8.1.2. Зависимость усилия отрыва от толщины фольги	168

3.8.1.3. Приспособления для отрыва фольги	169
3.8.1.4. Ширина полоски фольги для отрыва	170
3.8.1.3. Определение стойкости к воздействию пайки (термоудару).	170
3.8.1.4. Определение стойкости к воздействию химических растворов ...	173
3.8.1.5. Стойкость к условиям, имитирующим гальванический процесс.	174
3.9. Электрические испытания	174
3.9.1. Сопротивление диэлектрика.	174
3.9.1.1. Сопротивление токам утечки по объему и по поверхности.	174
3.9.1.2. Сопротивление токам утечки вдоль поверхности слоистых пластиков.	177
3.9.2. Электрическая прочность изоляции	178
3.9.2.1. Стандартные испытания электрической прочности	178
3.9.2.2. Электрическая прочность вдоль слоев ...	178
3.9.3. Диэлектрическая проницаемость.	179
3.9.4. Диэлектрические потери.	181
3.9.4. Электрическое сопротивление фольги.	181
3.10. Размерная стабильность тонких фольгированных стеклотекстолитов	182

Глава 4

Фотошаблоны	185
4.1. Материалы фотошаблонов — носители изображений	185
4.1.1. Общие свойства фотоматериалов	185
4.1.2. Серебросодержащие фотоматериалы	189
4.1.3. Диазопленки	197
4.1.4. Фотопленки для изготовления фотошаблонов ...	200
4.1.4.1. Общие сведения	200
4.1.4.2. Влияние влажности	200
4.1.4.3. Влияние температуры	201
4.1.4.4. Влияние режимов обработки	201
4.1.4.6. Размерная стабильность	202
4.1.4.8. Эффект «Серебряного слоя»	203
4.1.4.9. Время релаксации фотопленки	206

РОСТ-А
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
И МОНТАЖА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ



117342, г. Москва, ул. Бутлерова, 15
Тел.: +7 (095) 334-9461 Факс: +7 (095) 334-9611 E-mail: pcb@pcb.ru www.pcb.ru

4.1.4.10. Неравномерность свойств фотопленок в X и Y направлениях	204
4.1.4.11. Гистерезис	204
4.1.4.12. Подготовка фотошаблонов к работе	205
4.1.4.13. Создание условий вакуумной гигиены в рабочих помещениях — «чистые» комнаты	205
4.1.4.14. Пример расчета изменения размеров фотопленки	206
4.1.5. Фотостекла	206
4.2. Принципы прорисовки фотошаблонов	208
4.2.1. Методы ручной работы	208
4.2.1.1. Вычерчивание	208
4.2.1.2. Метод аппликации примагничивающимися элементами	208
4.2.1.3. Аппликация липкой лентой	208
4.2.1.4. Метод скрайбирования двухслойной пленки	209
4.2.1.5. Резание по эмали	209

4.2.2. Автоматические методы изготовления фотошаблонов	209
4.2.2.1. Векторный метод вычерчивания изображений	210
4.2.2.2. Наборный принцип	211
4.2.2.3. Растровый принцип	212
4.2.2.4. Возгонка масочного покрытия	215

Глава 5

Процессы печати	218
5.1. Введение	218
5.2. Фотолитография	218
5.2.1. Фотополимеры	218
5.2.2. Фоторезисты	220
5.2.3. Процессы при экспонировании фоторезистов	233
5.2.4. Разрешающая способность	224
5.2.5. Экспонирование фоторезиста	226
5.2.6. Инженерное обеспечение качества изображения	228
5.2.7. Материалы паяльных масок	231
5.3. Трафаретная печать	232
5.4. Офсетная печать	239

Глава 6

Системы совмещения	241
6.1. Погрешности совмещения элементов межсоединений	241
6.1.1. Основные понятия о совмещении	241
6.1.2. Математическая модель погрешностей совмещения	243
6.1.3. Позиционные погрешности	245
6.1.3.1. Случайные погрешности	245
6.1.3.2. Систематические погрешности	246
6.1.4. Линейно зависимые погрешности	247
6.1.5. Суммарные погрешности	249
6.1.6. Размеры элементов совмещения	250
6.1.7. Пример расчета конструктивных размеров	252
6.1.7.1. Суммарные погрешности совмещения	

ТелеРем www.telerem.ru smd@telerem.ru

КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРАФАРЕТОВ
 DIP МОНТАЖ
 SMD МОНТАЖ
 ПРОВЕРКА
 НАСТРОЙКА



(095)739-07-27; (095)536-87-37

элементов соединений	252
6.1.7.2. Минимальный размер контактной площадки	253
6.1.7.4. Надежность соединения	253
6.2. Системы совмещения	254
6.2.1. Виды систем совмещения	254
6.2.1.1. Размещение штифтов по одной стороне аготовки	255
6.2.1.2. Четырехслотовая система	255
6.2.1.3. L – конфигурация	255
6.2.1.4. Оптические системы совмещения	255
6.2.2. Оценка систем совмещения	256
6.2.3. Оптическая система совмещения	257
6.2.4. Оценка точности систем совмещения	259
6.2.4.2. Автоматическая, оптическая система совмещения (MASS»LAM)	260
6.2.4.3. Сравнение погрешностей	260
6.3. Анализ погрешностей совмещения	261

6.3.1. Выделение составляющих погрешностей совмещения	261
6.4. Управление совмещением в производстве	264
6.4.1. Подготовка информации	264
6.4.1.1. Общие меры	264
6.4.1.2. Изменение формы контактных площадок	265
6.4.1.4. Формирование технологического контура	265
6.4.1.5. Симметрирование слоев МПП	267
6.4.2. Изготовление фотошаблонов	267
6.4.3. Сверление отверстий	268
6.4.3.1. Общие меры предотвращения смещения	268
6.4.3.2. Корректирование масштабной компенсации	268
6.4.4. Прессование	270
6.4.4.1. Обеспечение симметричности конструкции платы, подбор базовых материалов	270
6.4.4.2. Направление волокон стеклоткани	270
6.4.5. Обеспечение стабильности окружающей среды	271

Глава 7

Процессы печати	273
7.1. Введение	273
7.2. Химические принципы процессов травления	274
7.2.1. Электрохимический ряд напряжений металлов	274
7.2.2. Принципы травления металлов	276
7.2.2.1. Травление с выделением водорода	276
7.2.2.2. Травление с восстановлением кислорода	277
7.2.2.3. Травление с образованием комплексов. ...	278
7.3. Травящие растворы в производстве печатных плат	282
7.3.1. Процессы и параметры травления	282
7.3.2. Травление в растворе хлорного железа (III)	284
7.3.3. Травление в персульфате аммония	286

Группа PS-ELECTRO

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И МОНТАЖ

NEW! **ОПН, ДПП - 1-2 дня! МПП - 3-5 дней!**
для заказов: market@psselectro.ru
с пометкой "Суперэкспресс"

ЭЛЕКТРОКОННЕКТ (головной офис)
г. Новосибирск, 630117, ул. Арбузова 1/1
тел/факс (383-3) 36-10-01, 36-10-03
e-mail: order@psselectro.ru, web: http://www.psselectro.ru

г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский филиал
ООО "Электрониконт" ул. Б-я Советская 24, оф. 210,
тел/факс (812) 274-87-81, 271-56-67,
e-mail: psselectro@petlink.ru

г. Москва, ООО "Печатные Платы"
ул. Сушиевская 21, тел/факс (095) 787-6501, 787-6502, 787-6503
e-mail: pps@psselectro.ru

г. Екатеринбург, ООО "КТЦ КЭБ"
ул. Белинского, 140/2, тел/факс (343) 251-28-68, 280-36-71
e-mail: csk@ceb-e-burg.ru

7.3.4. Травление в кислом растворе хлорида меди (II)	286
7.3.5. Травление в растворе хромовой кислоты	289
7.3.6. Травление в растворе перекиси водорода	289
7.3.7. Травление в щелочном растворе хлорита натрия	290
7.3.8. Травление в аммиачном комплексе хлорной меди	291
7.3.9. Осветление металлорезиста олово-свинец	292
7.4. Техника травления	293
7.5. Профильное травление	295
7.6. Очистка отверстий после сверления	296
7.6.1. Причины наволакивания смолы на стенки отверстий	296
7.6.3. Перманганатная очистка	297
7.6.4. Плазмохимическая очистка	299
7.6.6. Двойное сверление	300

изготовление печатных плат

быстро
и качественно



**срочное производство
и электротестирование
печатных плат**

- от 1 платы (от 0,1 кв.дм)
- очень быстро (от 6 часов)
- без предоплаты



**серийное производство
печатных плат.
МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ**

- срок изготовления
от 3-х недель
- частичная предоплата
- бесплатная доставка
по России (от 470 кв.дм)

**продажа оборудования
для производства
печатных плат**

www.tabe.ru
info@tabe.ru
(095) 995.34.08

TabeRu

ГЛАВА 1

КОНСТРУКЦИИ И СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

1.1. Почему «печатная плата»?

Понятие «печатная плата» расшифровывается самим названием этого объекта нашего внимания. Слово «плата» означает плоское основание. Оно может быть жестким и гибким. Но главное, что от него требуется, — иметь способность для восприятия технологий печати: фотолитографии, трафаретной и офсетной печати, гравирования, скрайбирования и т.п. Зачем это нужно?

К определенному моменту объемы производства электронной аппаратуры выросли настолько, что, в первую очередь, возникла потребность в увеличении производительности технологий межсоединений электронных компонентов, объемы производства которых растут гигантскими темпами. Для удовлетворения этой потребности заимствовали технологию печати из полиграфической промышленности, изделия которой (газеты, книги) за короткое время выпускаются миллионными тиражами. Точность позиционирования знаков в полиграфической многоцветной продукции тоже удовлетворяла требованиям прецизионности совмещения элементов монтажа в многослойных структурах межсоединений.

Использование печатных плат явилось основой высокопроизводительного, экономичного, поддающегося полной автоматизации, массового производства электронной аппаратуры.

Плоское основание печатных плат позволяет:

- использовать процессы полиграфии для формирования токопроводящего рисунка в массовом производстве;

Fastwel

**КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
компоненты, ПП, сборка, тест**

- использовать координатные столы для автоматической установки электронных компонентов;
- использовать высокопроизводительные методы групповой пайки;
- использовать монтажное основание — печатную плату, в качестве конструкционного основания электронных узлов и блоков. Методы полиграфии позволяют:
- реализовать высокопроизводительные методы воспроизводства межсоединений;
- реализовать высокую точность позиционирования элементов печатного рисунка, необходимую для автоматизации сборки и монтажа компонентов;
- обеспечить автоматизацию контроля монтажа электронных компонентов за счет большой точности совпадения позиционного положения инструмента контроля (контактов, оптической стигмы и т.п.) с положением компонентов и контактных площадок на печатных платах.

1.2. История

Печатные платы имеют гораздо более раннее происхождение, чем полагают обычно. Так в английском патенте, выданном в 1903 году на имя Хенсона, описывается технология переноса ленточных проводников на диэлектрическое основание. Можно увидеть, что с 1923 по 1939 г. было выдано много патентов, определивших современный облик технологий и конструкций печатных плат¹. Посудите сами, уже тогда были описаны основы технологий печатных плат: штамповка металлической фольги, заполнение металлом рельефа в диэлектрическом основании, полученным различными способами, в том числе и литьем, гальваническое осаждение металла и последующее травление рисунка. Наиболее далеко продвинулась технология травления фольги для изготовления электрических нагревателей. За счет использования технологии печати в США в 1946 году выпускали в смену 5000 миниатюрных бесконтактных взрывателей для снарядов окопных минометов. Приблизительно в то же время в Англии начали изготовление радиоприемников на основе технологии прессования

¹ Сведения о патентах, заявленных до 1946 года можно найти в работах [5] и [6]

рельефа печатных плат с циклом выпуска 20 с. Но в те времена методы печати плат еще не были востребованы промышленностью. Несколько позже из-за потребности в массовой электронизации оружия была продвинута в промышленность технология, основанная на использовании избирательного травления фольгированных диэлектрических оснований. Этим был сделан первый шаг к действительно новой технике монтажа: от соединений проводами (от точки к точке) к одноразовым (групповым) методам. Из всех перепробованных вариантов изготовления монтажных оснований (различные методы избирательной металлизации, методы переноса, штамповки, чеканки, прессования и т.п.) именно этот метод субтрактивного² травления фольги нашел наибольшее распространение вплоть до наших дней. В российских стандартах этот метод получил официальное название — «химический», в среде технологов его называют «негативным», по виду используемых для этого метода фотошаблонов — негативов.

Главный недостаток техники травления состоит в том, что химически удаляется предварительно нанесенный слой. Затраты на утилизацию отработанных травильных растворов увеличивают стоимость плат. Поэтому неудивительно, что предпринимались неоднократные попытки изготавливать платы прямым путем, так называемым, аддитивным³ методом, то есть избирательным осаждением металла (чаще химическим восстановлением) на участки, где он нужен для создания проводимости. После многолетних исследований лишь, в последние годы удалось найти промышленные технологии избирательной металлизации изоляционных оснований, которые по своим техническим и экономическим характеристикам смогли сравниться с субтрактивной технологией. Современные технологии печатных плат содержат и субтрактивные (травление проводников) и аддитивные (металлизация отверстий) процессы. Поэтому они называются комбинированными.

Развитие технологии производства печатных плат идет по следующим направлениям:

- удешевление печатных плат за счет:
- максимальной автоматизации процессов проектирования, подготовки производства и производственных процессов;

² От латинского *subtratio* — отнимание, вычитание, удаление.

³ От латинского *additio* — прибавлять, добавлять.

- снижения объемов брака;
- удешевления расходных материалов;
- уменьшения затрат на решение экологических проблем; доля которых в себестоимости продукции может достигать 30%;
- дальнейшее увеличение прецизионности и плотности межсоединений — печатных платах с тем, чтобы еще дальше продвинуться в увеличении плотности компоновки высокоинтегрированной элементной базы:
 - использование фотолитографических материалов (фоторезистов, паяльных масок) в качестве элементов электроизоляционной конструкции;
 - поочередное формирование и наращивание токопроводящих и изоляционных слоев — технология послойного наращивания;
 - многоуровневые межсоединения в многослойных структурах;
 - использование преимуществ лазерной технологии (лазерной фотолитографии, лазерного сверления, фрезерования, контроля и т.п.);
 - использование нагревостойких материалов (полиимида, карбамидов и др.), обеспечивающих термомеханическую устойчивость печатного монтажа;
 - совмещение в одной конструкции электрических и теплоотводящих элементов.

1.3. Классификация конструкций печатных плат

Под печатной платой понимается конструкция электрических межсоединений на изоляционном основании. Печатная плата с установленными и смонтированными на ней электронными компонентами представляет собой печатный узел, способ его формирования назван печатным монтажом. Проводники, лежащие в одной плоскости, называют печатным рисунком, слоем. По функциональному назначению различают сигнальные (информационные), потенциальные (заземление, питание), экранирующие и технологические слои проводников, а по расположению — внутренние и внешние слои. Кроме проводников платы содержат:

- присоединительные элементы монтажа: контактные площадки и монтажные отверстия;

- фиксирующие (базовые) элементы для совмещения выводов корпусов электронных компонентов с контактными площадками или монтажными отверстиями на печатной плате;
- печатные ламели для контактирования с разъемами;
- теплоотводящие и тепловыравнивающие участки;
- маркированные слои;
- технологические контактные площадки;
- паяльные маски — термостойкое электроизоляционное пленочное покрытие;
- элементы схем, выполняемые методами печати: индуктивности, емкости, сопротивления.

В зависимости от назначения и от возможностей производства печатные платы выполняют односторонними, двусторонними или многослойными, на жестком или гибком основании.

Односторонние печатные платы представляют собой изоляционное основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок. Для механической фиксации выводов штыревых компонентов в плате служат сквозные неметаллизированные отверстия, а для присоединения — контактные площадки, которыми заканчиваются все печатные проводники. Трассировка проводников на одной поверхности (в одном слое, в одном уровне) не позволяет разрешить конфликт пересекающихся трасс иначе, как установкой навесных проводных перемычек.

Двусторонняя печатная плата имеет одно основание, на обеих сторонах которого выполнены проводящие рисунки, и все требуемые электрические соединения двух сторон, соединяются преимущественно сквозными металлизированными отверстиями. Конфликты пересекающихся соединений здесь решаются возможностью переноса конфликтующей трассы в обход на другую сторону печатной платы с использованием металлизированных отверстий. Такое отверстие для переноса трассы называют переходным, в отличие от монтажного. При этом конструкция переходного отверстия может быть произвольной, а монтажного — по нормам формирования паяного узла.

Тем не менее, полностью конфликтность трасс не разрешается: цепи питания и земли, монтажное поле для присоединения выводов многовыводных компонентов (микросхем) мешают свободному размещению сигнальных трасс. Эта конфликтность частично разрешается в четырех слоях межсоединений.

Четырехслойные печатные платы содержат на внутренних слоях потенциальные цепи (питания и земли), а на внешних (наружных) слоях сигнальные трассы и монтажное поле присоединения компонентов. Конструкции четырехслойных печатных плат выгодно выполнять так, чтобы их можно было изготавливать по технологии двусторонних.

Многослойные печатные платы (МПП) содержат чередующиеся слои тонких изоляционных подложек с нанесенными на них проводящими рисунками, физически соединенными в одно многослойное основание. Электрические соединения в многослойной структуре МПП осуществляются сквозными (преимущественно) или глухими отверстиями. Каждый из внутренних слоев может представлять собой одностороннюю плату или двустороннюю с межслойными переходами.

Слои в МПП имеют определенное функциональное назначение:

- наружные монтажные слои конструируются и используются для монтажа электронных компонентов;
- сигнальные слои, несут на себе топологическую схему сигнальных межсоединений;
- слои земли и питания выполняют, как правило, большими полигонами с минимальным омическим и индуктивным сопротивлением, они одновременно служат электрическими экранами, заземленными по высокой частоте развязывающими емкостями;
- теплоотводящие или тепловыравнивающие слои.

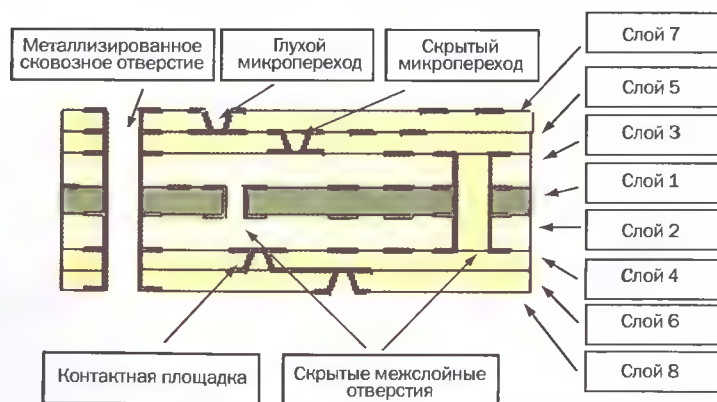


Рис. 1.1. Многоуровневые межсоединения в МПП

Увеличение плотности компоновки, связанное с этим увеличением количества межсоединений обычно решались увеличением слоев. Существуют примеры создания 40 и более слойных МПП. Сегодня преимущественное направление увеличения количества межсоединений:

- увеличение плотности трасс за счет уменьшения шага трассировки с одновременным уменьшением ширины проводников;
- выполнения межслойных переходов в шаге трасс, то есть в размерах тонких проводников;
- выполнением многоуровневых межсоединений в многослойных структурах: сквозных, слепых, глухих (рис. 1.1.).

Гибкие печатные платы, по существу, реализации межсоединений подобны односторонним, двусторонним и многослойным с той разницей, что изоляционные и металлические слои выполняются тонкими, для гибкости из материалов, выдерживающих многократные изгибы.

1.4. Методы изготовления печатных плат

Основные технологические принципы изготовления печатных плат:

- субтрактивный;
- аддитивный;
- полуаддитивный, сочетающий преимущества субтрактивного и аддитивного методов¹;
- комбинированный.

1.4.1. Субтрактивные методы

Субтрактивный метод наиболее освоен и распространен для простых и очень сложных конструкций печатных плат. Собственно, с него исторически начиналась индустрия печатных плат. В качестве исходного материала используются фольгированные (в основном медью) изоляционные материалы. После переноса рисунка печатных проводников в виде стойкой к растворам травления пленки на фольгированную основу, незащищенные ею места химически травятся. Защитную пленку наносят методами полиграфии: фотолитографией, трафаретной печати и др. При использовании фотолитографии, защитная

¹ Полуаддитивный метод может с такой же достоверностью называться и полусубтрактивным, но закрепился термин «полуаддитивный».

пленка формируется из фоторезиста материала, очувствляемого через фотокопию печатного рисунка — фотошаблон. При трафаретной печати используют специальную, химически стойкую краску, называемую трафаретной.

1.4.1.1. Химический метод

Субтрактивный метод, в чистом виде, реализуется в производстве односторонних печатных плат, где присутствуют только процессы селективной защиты рисунка проводников и травли металла фольгированных диэлектриков с незащищенных мест (рис. 1.2.).



Рис. 1.2. Фрагменты субтрактивного (химического) метода изготовления ПП: 1 — фотошаблон; 2 — защитная пленка; 3 — фоторезист; 4 — фольга; 5 — основание ПП; 6 — экспонирование фоторезиста (3) через фотошаблон (1) и защитную пленку (2); 7 — рисунок из фоторезиста проявлен и способен защитить фольгу от травления; 8 — рисунок из фольги вытравлен; 9 — фоторезист удален (он мешает пайке), после сверления монтажных и крепежных отверстий плата будет готова.

Схема стандартного субтрактивного (химического) метода изготовления односторонних печатных плат:

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий;
- подготовка поверхности фольги (дезоксидация), устранение заусенцев;
- трафаретное нанесение кислотостойкой краски, закрывающей участки фольги, подлежащих вытравливанию;
- травление открытых участков фольги;
- сушка платы;
- нанесение паяльной маски;

- горячее облуживание открытых монтажных участков припоем;
- нанесение маркировки;
- контроль.

Главные фрагменты субтрактивной технологии на основе фотолитографии показаны на рис. 1.2

Преимущества:

- возможность полной автоматизации процесса изготовления;
- высокая производительность;
- низкая себестоимость.

Недостатки:

- низкая плотность компоновки связей;
- использование фольгированных материалов;
- наличие экологических проблем из-за образования больших объемов отработанных травильных растворов.

1.4.1.2. Механическое формирование зазоров (оконтуривание проводников)

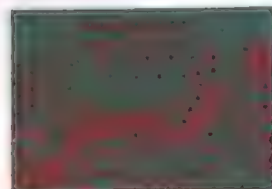
Вместо химического травления, изоляционные зазоры между проводниками можно формировать механическим удалением при помощи режущего инструмента. Для изготовления односторонних печатных плат можно обойтись всего одним станком с ЧПУ, позволяющим по программе сверлить сквозные отверстия и скрайбировать зазоры.

Скрайбирование обычно ведется коническими фрезами с углом при вершине 60 или 30 градусов (в ряде случаев — менее 18 градусов). Для получения стабильной ширины контурной канавки необходимо строго контролировать глубину врезания фрезы в заготовку. Неплоскостность подложки, неравномерный прижим заготовки к рабочему столу могут привести к разбросу ширины реза. Именно поэтому сверлильно-фрезерные станки должны иметь специальные прижимные головки, принудительно выравнивающие заготовки плат в плоскость стола станка.

Метод отличается коротким технологическим циклом изготовления, малой капиталоемкостью, не создает экологических проблем. Он очень удобен для изготовления полноценных экспериментальных образцов монтажных подложек. Но образцы плат получаются дороже (большой расход фрез), чем изготовленные химическим методом. Поэтому и из-за большого ритма выпуска (плата изготавливается более, чем 4 часа) этот метод не годится для серийного производства.

Таблица 1.1. Разновидности плат, полученных методом скрайбирования контура проводников

■ Текстолит
■ Медь
■ Отверстия



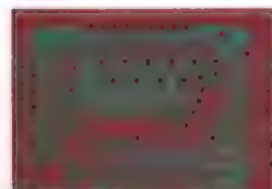
Вид платы при изготовлении ее традиционной химической технологией.
Ширина проводника – 0.25 мм
Диаметр отверстия – 0.8 мм.



Простейшее оконтуривание.



Дополнительно, оконтурены контактные площадки, в которые осуществляется монтаж элементов.



Дополнительная выборка в особо ответственных местах, например, при монтаже кристалла на плату. При выборки больших площадей могут использоваться цилиндрические фрезы.



Иногда при фрезеровании остаются узкие или острые фрагменты проводящего рисунка (меди). Для снижения риска отслаивания фольги острые углы скругляются, а узкие полоски фольги из пробельных мест удаляются.

Чтобы избежать необходимости химических процессов металлизации отверстий, при изготовлении печатных плат методами скрайбирования и фрезеровки используют примитивные методы соединения двух сторон, как показано на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Возможные виды межсоединений двух сторон скрайбированных плат: проводной перемычкой, опаиваемой пустотелой заклепкой, опрессовываемой заклепкой.

При скрайбировании контура проводников фрезы неизбежно вспарывают стеклоткань диэлектрика, что повышает его восприимчивость к загрязнениям. Поэтому такие платы требуют повышенного внимания к последующим процессам защиты поверхности от воздействия внешних сред паяльной маской или специальной пропиткой, не мешающей пайке, или лакировкой после монтажа.

1.4.1.3. Лазерное гравирование

Ультрафиолетовые лазеры (экимерные и *Nd:YAG* или *Nd:LIF*-лазеры) способны испарять медь фольги и минимально травмировать диэлектрическую подложку. Это позволяет использовать их для гравирования контуров проводников. Современное оборудование, предназначенное для этой цели, сочетает в себе две лазерных головки: CO_2 -лазер и УФ-лазер, которые попеременно сверлят сквозные и глухие отверстия и гравировывают пробельные места плат.

Лазерные методы прямого формирования рисунка высокопроизводительны, воспроизводят рисунок с разрешением проводник/зазор = 0,05/0.05 мм. Но пока это оборудование слишком дорого для повсеместного использования.

1.4.2. Аддитивные методы

Эти методы предполагают использование нефольгированных диэлектрических оснований, на которые тем или другим способом, избирательно (там, где нужно) наносят токопроводящий рисунок. Разновидности метода определяются способами металлизации и избирательностью металлизации.

Токопроводящие элементы рисунка можно создать:

- химическим восстановлением металлов на катализированных участках диэлектрического основания (толстослойная химическая металлизация — ТХМ);
- переносом рисунка, предварительно сформированного на металлическом листе, на диэлектрическую подложку (метод переноса);
- нанесением токопроводящих красок или паст или другим способом печати;
- восстановительным вжиганием металлических паст в поверхность термостойкого диэлектрического основания из керамики и ей подобных материалов;
- вакуумным или ионно-плазменным напылением;
- выштамповыванием проводников.

Избирательность осаждения металла можно обеспечить:

- фотолитографией (через фотошаблон) фоторезиста, закрывающего в нужных местах участки поверхности основания, не подлежащие металлизации (для метода толстослойной химической металлизации — ТХМ);
- избирательным фотоочувствлением (через фотошаблон или сканирующим лучом) катализатора, предварительно нанесенного на всю поверхность основания (для фотоаддитивного метода ТХМ);
- трафаретной печатью (для паст и красок);
- масочными защитами (для вакуумной и ионноплазменной металлизации).

1.4.2.1. Фотоаддитивный процесс.

Схема процесса *фотоаддитивной* технологии (как пример одного из вариантов аддитивного метода):

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий под металлизацию;
- нанесение фотоактивируемого катализатора на все поверхности заготовки и в отверстия;
- активация катализатора высокоэнергетической экспозицией через фотошаблон-негатив;
- толстослойное химическое меднение активированных участков печатной платы (печатных проводников и отверстий);
- отмычка платы от остатков технологических растворов и неактивированного катализатора;

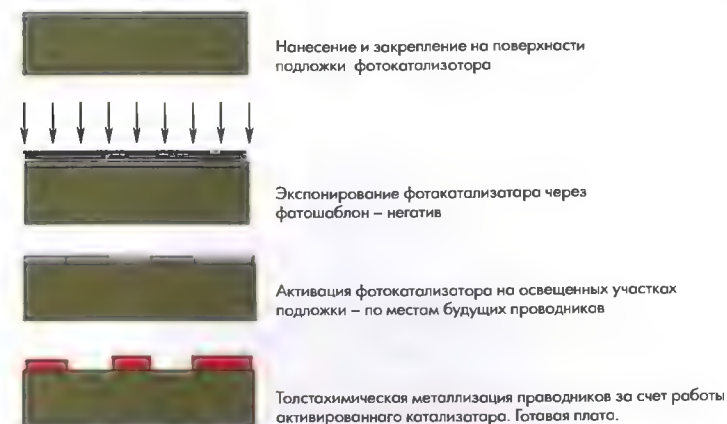


Рис. 1.5. Схема фотоаддитивного процесса

- глубокая сушка печатной платы;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы — сертификация.

Основные фрагменты фотоаддитивного метода показаны на рис. 1.5.

Преимущества:

- использование нефольгированных материалов;
- возможность воспроизведения тонкого рисунка.

Недостатки:

- длительный контакт открытого диэлектрика с технологическими растворами металлизации, ухудшающими характеристики электрической изоляции без дополнительных мер по отмывке;
- длительность процесса толстослойного химического меднения.

1.4.2.2. Аддитивный процесс

Схема процесса *аддитивной* технологии с использованием фоторезиста:

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий под металлизацию;
- нанесение катализатора на всю поверхности заготовки и отверстий;
- нанесение и экспозиция фоторезиста через фотошаблон-позитив;

- проявление фоторезиста с обнажением участков поверхности платы с нанесенным катализатором;
- толстослойная химическая металлизация отверстий и проводников;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы — сертификация.

Преимущества:

- использование нефольгированных материалов;
- изоляционные участки платы защищены фоторезистом — изоляция не загрязняется технологическими растворами;
- фоторезист может оставаться на плате в качестве защитного покрытия.

Недостатки:

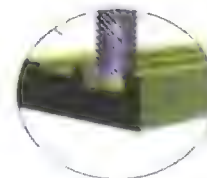
- длительный процесс толстослойной химической металлизации;
- необходимость использования фоторезиста, стойкого к длительному воздействию растворов химического меднения с щелочной реакцией.

1.4.2.3. Нанесение токопроводящих красок или металлонаполненных паст

Главные проблемы этого метода:

- создание в проводниках нужной проводимости, желательно соизмеримой с основным металлом;
- возможность воспроизведения рисунка с хорошим разрешением;
- обеспечение паяемости.

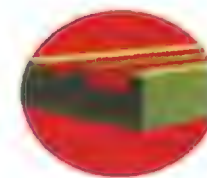
Проблемы проводимости могут быть решены, при условии максимального удаления связующего, разделяющего металлические частицы, из объема краски или пасты. Наилучшим образом, это достигается при высоких температурах обработки. Но для этого требуются нагревостойкие диэлектрические основания, типа стекла (силл), керамики (стеатит). Нанесение проводников на органические основания менее успешны из-за их ограниченной нагревостойкости и связанными с этим трудностями в удалении связующего для сближения металлических частиц. Поэтому на органических подложках удается достичь 20% проводимости от чистого металла.



Гравирование рельефа проводников и контактных площадок в диэлектрической подложке. Используется сверлильный станок с ЧПУ с нормированным заглублением инструмента в обрабатываемую подложку.



Заполнение углублений рельефа металлонаполненной пастой (контактолом). Используется станок трафаретной печати с нормированной скоростью перемещения ракеля. Черным обозначен рапель станка, красным — металло-содержащая паста (контактол).



Термообработка в печи с нейтральной средой. Связующее металлонаполненной пасты выгорает. Металлические частицы спекаются, образуя металлическую дорожку — проводник и контактную площадку.



Гравирование топологии рельефа другой стороны платы на станке с ЧПУ. Совмещение топологий двух сторон достигается за счет использования единых баз.



Сверление сквозных отверстий на станке с ЧПУ.



Заполнение углублений рельефа металлонаполненной пастой (контактолом) на другой стороне платы с использованием того же станка трафаретной печати с нормированной скоростью перемещения ракеля.

Рис.1.7. Схема процесса изготовления рельефных плат с заполнением рельефа и отверстий металлонаполненными пастами.



Термообработку в той же печи с нейтральной средой.

Сверление сквозных монтажных и переходных отверстий по металлу, наполняющему рельеф.

Рис.1.7. Схема процесса изготовления рельефных плат с заполнением рельефа и отверстий металлонаполненными пастами.

Вообще, чем выше температура обжига, тем лучше условия для обеспечения большей проводимости, силы сцепления с подложкой, паяемости. Наиболее удовлетворительные результаты получены с составами на основе серебра и связующего из мелкодисперсного низкоплавкого стекла (фритты). При обжиге, с подъемом температуры до 500...800°С улетучивается растворитель, выгорает органическое связующее и, наконец, плавится фритта. При охлаждении частички серебра прочно сцепляются в объеме стекла (фритты), которое, в свою очередь, прочно сцепляется с керамической подложкой. Проводимость вожженных проводников может достигать 95% проводимости чистого серебра.

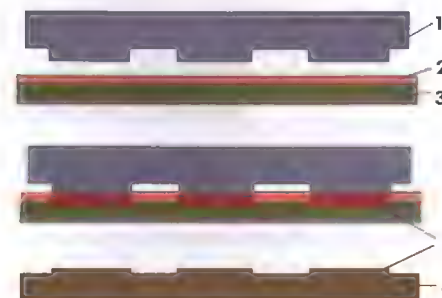
Токопроводящую краску обычно наносят методом трафаретной печати, обеспечивая минимальную ширину проводника 0,8 мм при норме 1,5 мм. При этом формирование проводящего слоя в отверстиях связано с большими трудностями.

Появилась возможность изготовления полноценных плат, в которых токопроводящие краски заполняют рельеф проводников и отверстий. Такой процесс можно считать полностью аддитивным. Схема его показана на рис. 1.7. Авторы утверждают, что эта технология способна воспроизводить проводники и зазоры шириной по 0,15 мм, отверстия диаметром 0,15 мм, в основании толщиной 0,4 мм. Типичное время изготовления двусторонней платы — 3...4 часа, 4-слойной — 8...10 часов.

1.4.2.4. Горячая запрессовка металлического порошка (тиснение)

Тонкодисперсная металлическая пудра (порошок) наносится на поверхность подложки опудриванием, пульверизацией, катафорезом, накатыванием или любым другим способом. Затем нагретым штампом с рельефом, соответствующим топологии схемы, порошок впрессовывается в основание подложки. На пробельных местах порошок не закрепляется и удаляется для использования. Штамп может одновременно вырубать отверстия и контур плат. Этот метод незаменим для массового тиража плат из дешевых материалов подложек: картона, листовых термопластичных и термореактивных пластмасс и др. Схема процесса тиснения показана на рис. 1.8.

Рис.1.8. Впрессовывание металлического порошка в диэлектрическое основание: 1 — горячая плита штампа; 2 — свободно нанесенный металлический порошок; 3 — полутвержденное или термопластичное полимерное основание — подложка; 4 — впрессованный в подложку металл; 5 — отвержденный полимер — подложка.



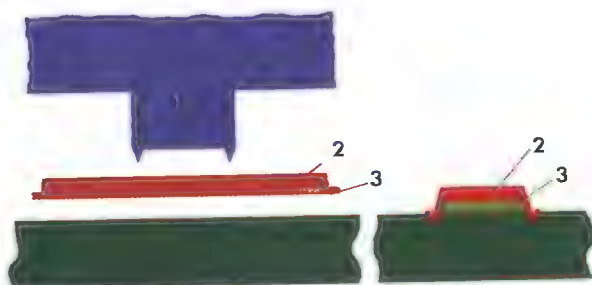
1.4.2.5. Штампование

При этом способе, медную фольгу сматывают с ролей, покрывают соответствующим клеящим веществом и подают в автоматический штампальный пресс, как показано на рис. 1.9. Фольга вырубается и впрессовывается в изоляционный материал острыми кромками штампа по периметру проводников. Нагретый штамп не только впрессовывает края фольги в изоляционный материал, но и расплавляет склеивающее вещество, благодаря чему обеспечивается прочное сцепление проводников с основанием. Температура нагрева штампа зависит от используемого клеящего вещества и составляет приблизительно 110°С для термопластичных и 150°С для термореактивных смол. Время выстоя штампа при склеивании тер-

мопластичной смолой составляет примерно 2 сек. Для термореактивной смолы оно значительно больше (для окончательного отверждения). Поэтому для ускорения процесса, чтобы время выстоя штампа было минимальным, обеспечивают лишь закрепление фольги на подложке. После сверления отверстий, вырубки пазов, для разобширения цепей схема вновь нагревается под давлением до окончательного отверждения клеящего вещества.

Рис. 1.9. Штамповка (впрессовывание) проводников в подложку:

- 1 — штамп;
- 2 — фольга;
- 3 — клей;
- 4 — подложка (диэлектрическое основание).



1.4.2.6. Метод переноса

К аддитивным процессам можно полноправно отнести и метод переноса. Один из перспективных вариантов реализации такого процесса с использованием электрохимического осаждения металлов (ПАФОС) показан на рис. 1.10. В методе переноса проводящий рисунок создается на временных «носителях» — листах из нержавеющей стали, поверхность которых предварительно покрывается гальванически осажденной медью толщиной 2...5 мкм.

По тонкому медному покрытию формируется защитный рельеф фоторезиста. Проводники получают гальваническим осаждением тонкого слоя никеля (2...3 мкм) и меди (30...50 мкм) в рельеф фоторезиста. Затем фоторезист удаляют и проводящий рисунок на всю толщину впредсывают в диэлектрик. Впрессованный рисунок проводников вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности временных носителей. Таким образом, его переносят с металлического листа на диэлектрическую подложку. Отсюда название процесса — «метод переноса».



Рис. 1.10. Схема изготовления печатных плат методом переноса

В слоях без межслойных переходов медная шина стравливается. При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами тонкая медная шина служит проводящим подслоем для электрохимического процесса металлизации отверстий.

Проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и сверху защищенный слоем никеля, не подвергается травлению при стравливании меди. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяется рисунком рельефа в фоторезисте, то есть процессами фотолитографии.

1.4.2.7. Общая оценка аддитивных методов

В большинстве аддитивных методов полностью отсутствуют процессы травления (удаления металла — субтракции), и, в этом смысле они экологически чистые, хотя другие, сопутствующие им процессы (отмывки от технологических загрязнений и растворов, избыточность растворов химической металлизации при их корректировках и т.п.) загрязняют промышленные стоки, но не в той мере, как субтрактивные технологии. И если все-таки процессы травления в них присутствуют (ПАФОС), то их объемы настолько незначительны, что они не создают серьезных экологических проблем.

Распространению аддитивных методов мешает ряд сложностей их использования:

- нет возможности использовать высокопроизводительные процессы электрохимической металлизации элементов печатного монтажа на диэлектрическом основании из-за их электрической разобшенности. Это, правда, не относится к методу ПАФОС;
- толстослойная химическая металлизация (ТХМ) — сложный и низкопроизводительный процесс, требующий управления по большому количеству параметров. При любых сбоях управления он способен разрушаться с большими издержками для производства. Мало того, этот процесс имеет большую длительность: для достижения приемлемой толщины осаждения (например, 25 мкм для меди) процесс длится часами. Надежность технологических и энергетических систем зачастую не позволяет выдерживать нужные режимы осаждения в течение этого времени;
- по всем (кроме чисто аддитивного процесса) схемам затруднена металлизация отверстий;
 - токопроводящие пасты имеют повышенное сопротивление, от чего, по крайней мере, цепи питания не могут быть реализованы приемлемыми ширинами проводников;
 - напыление через маски требует их очистки от осевших на них металлов химическим травлением, что уравнивает их с субтрактивными методами;
- штампы для тиснения металлического порошка и выштамповки проводников из фольги дорогие, так что они оправдывают себя только при объемах партии более десятков тысяч.

1.4.3. Полуаддитивные методы

Полуаддитивные методы придуманы, чтобы избавиться от длительных и неустойчивых процессов ТХМ, заменив их на высокопроизводительные надежные электрохимические (гальванические) методы металлизации. Но для электрохимических методов металлизации электроизоляционных оснований нужен токопроводящий подслей. Его создают любым способом, удовлетворяющим требованиям по проводимости и прочности сцепления с подложкой:

- химическим осаждением тонкого слоя (до 1 мкм) металла. Процесс тонкослойной металлизации длится не более 15 мин и не требует высокой технологической надежности;

- вакуумным напылением металла, в том числе магнетронным;
- процессами газотермической металлизации;
- процессами термолита металлоорганических соединений.

Уместно заметить, что для полуаддитивных методов неприемлемы процессы прямой металлизации, так как их использование связано с большим расходом катализатора, и возникают проблемы удаления проводящего подслоя из пробельных мест.

1.4.3.1. Классический полуаддитивный метод

По этому методу диэлектрическая подложка металлизуется тонким проводящим слоем.

По проводящему слою на подложку наносится и проявляется фоторезист или трафаретный рисунок из химически стойкой краски. В рельефе проявленного фоторезиста гальванически наращивается металл до толщин, обеспечивающих его механическую прочность и токонесущую способность проводников и отверстий (для меди — порядка 25...35 мкм). После этого защитные покрытия (фоторезист, краски) удаляются, в результате в пробельных местах обнажается тонкий проводящий подслей (порядка 1 мкм), который теперь не нужен и подлежит удалению для электрического разобшенения элементов печатного монтажа. Стравливание такого тонкого подслоя (1 мкм) связано с гораздо меньшими затратами на очистку промышленных стоков, чем травление фольги (18...35 мкм). Мало того, стравливание тонкого слоя не создает такого подтравливания проводников, как для субтрактивных методов. Это означает, что при использовании полуаддитивных методов тонкие проводники и зазоры воспроизводятся гораздо лучше. Можно сказать, что разрешающая способность полуаддитивных методов соизмерима с возможностями используемых фоторезистов.

Распространению полуаддитивных методов мешает слабая сила сцепления проводников с подложкой и химическая неоднородность поверхностей промышленных диэлектриков, заставляющие для их компенсации использовать сложные процессы подготовки (активации) поверхности. В противовес этому производители фольгированных материалов научились изготавливать материалы с ультратонкой фольгой, что снимает необходимость в использовании технологических операций металлизации поверхностей у производителей печатных плат, а для отверстий применять процессы прямой металлизации.

Тем не менее, полуаддитивные методы незаменимы, когда необходимо по тем или иным причинам использовать нефольгированные диэлектрические подложки или получать тонкие проводники и зазоры (менее 0,1 мм).

Схема полуаддитивного процесса:

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий под металлизацию;
- нанесение тонкого проводящего подслоя (чаще — тонкослойная химическая металлизация медью толщиной до 1 мкм);
- усиление тонкого слоя металлизации — гальваническая затяжка (до 6 мкм);
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотшаблон-позитив;
- основная гальваническая металлизация (до 25 мкм в отверстиях);
- гальваническое нанесение металлорезиста (олова, олова-свинца, олова-никеля, олова-кобальта, серебра, золота, никеля или др.);
- удаление экспонированного фоторезиста;
- вытравливание тонкой металлизации (гальванической затяжки) с пробельных участков;
- травление металлорезиста на основе олова для последующего нанесения паяльной маски;
- гальваническое осаждение контактных покрытий на концевые ламели;
- отмывка платы от остатков технологических растворов;
- глубокая сушка печатной платы;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишных покрытий на монтажные элементы под пайку;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы — сертификация.

Преимущества:

- использование нефольгированных материалов;
- хорошее воспроизведение тонких проводников.

Недостатки:

- недостаточная адгезия металлизации к диэлектрической подложке;

контакт открытой поверхности диэлектрика с растворами металлизации приводит к его загрязнению и требует дополнительных усилий для обеспечения требуемых электроизоляционных свойств.

1.4.3.2. Аддитивный метод с дифференциальным травлением

Этот процесс отличается от классического лишь тем, что в нем нет металлорезиста: для формирования рисунка используется разница в толщинах металлизации проводников (>30 мкм) и пробельных мест (<6 мкм). Трудности реализации этого варианта аддитивного процесса состоят в необходимости создания равномерной толщины металлизации по всей поверхности заготовки. Иначе, где-то рисунок будет перетравлен, где-то не вытравлен. Такой равномерности по современным представлениям можно достичь, используя гальваническую металлизацию с реверсом тока и специальные для такой технологии выравнивающие добавки.

Преимущества:

- высокое разрешение рисунка;
- меньшие прямые расходы за счет отсутствия операции нанесения и удаления металлорезиста.

Недостатки:

- повышенные капиталозатраты для оснащения электрохимических операций;
- сложность управления процессом дифференциального травления.

1.4.3.3. Рельефные платы

Принципы изготовления рельефных плат можно без сомнений отнести к полуаддитивным методам, поскольку в их основе заложено использование нефольгированных подложек. Рельефные платы (РП) представляют собой диэлектрические основания, в которые углублены медные проводники, выполненные в виде металлизированных канавок, и сквозные металлизированные отверстия для монтажа выводов и соединения трасс на двух сторонах платы.

Авторами большинства распространенных конструкций и технологий РП в нашей стране являются русские изобретатели А.В. Богданов и Ю.А. Богданов.

Один из наиболее распространенных методов изготовления РПП включает следующие основные операции:

- Выполнение рельефа проводников — углублений по трассам проводников и сверление отверстий. Если рельеф выполняется фрезерованием; сначала он выполняется на одной стороне; затем на другой. Сверление конусным сверлом с двух сторон платы; так что конусы сходятся, как показано на рисунке 1.12. Рельеф можно выполнить методами тиснения, прессования и литья.

- Очистка поверхности РП. С целью обеспечения равномерности последующей химической металлизации поверхностям РП придают шероховатость.

- Металлизация поверхностей и отверстий: химическое меднение или вакуумная металлизация толщиной 0,5...1 мкм усиливаются гальваническим наращиванием меди до толщины 25...40 мкм.

- Нанесение защитного резиста — покрытие всей поверхности, рельефа и отверстий металлизированной заготовки кислотостойкой защитной краской (жидкой спиртоканифольной смесью или нитро-краской, нитрошпаклевкой).

- Удаление защитного резиста с пробельных мест (зернением, шлифованием). Защитная краска остается во всех углублениях — элементах проводящего рисунка. Обнажаются для травления пробельные места.

Операция зернения обычно проводится в так называемых «зернильных установках» — вибрирующих бункерах, в которые, кроме рельефной заготовки, помещены керамические шарики. Многочисленные удары шариков по заготовке «оббивают» краску с пробельных мест. Диаметр керамических шариков выбирают таким, чтобы удары не могли «выбить» краску из углублений рельефа и отверстий.

Шлифование поверхности пробельных мест, как правило, производится с помощью вибрационных машин.

- Травление металла с пробельных мест. Удаление медного покрытия с незащищенных краской пробельных мест проводится в кислотных растворах, не растворяющих защитные краски.

- Лужение проводящего рисунка для обеспечения паяемости и защиты меди от окисления. Лужение производят путем погружения заготовки в ванну с расплавленным легкоплавким припоем.

Модификация этой последовательности операции предусматривает предварительную тонкослойную металлизацию рельефной заготовки и накатка краски на пробельные места. Это позволяет

осуществить локальное гальваническое наращивание меди только в канавки и отверстия. После дополнительного гальванического осаждения металлорезиста в рельеф, удаляют краску с пробельных мест и травливают медь с этих участков.

1.4.4. Комбинированные методы

Комбинированные методы объединяют в себе все приемы изготовления печатных плат, необходимые для изготовления печатных проводников и металлизированных отверстий. Поэтому они называются комбинированными. В зависимости от последовательности операций формирования печатных проводников и металлизированных отверстий различают *комбинированный позитивный метод* (используются фотошаблоны — позитивы) и *комбинированный негативный* (используются фотошаблоны — негативы).

1.4.4.1. Комбинированный негативный метод

В негативном методе сначала вытравливаются проводники, и затем металлизуются отверстия. Метод возник, когда в производстве еще отсутствовали сверлильные станки с программным управлением, и платы были вынуждены сверлить вручную по рисунку схемы (по контактным площадкам). Поскольку после травления рисунка нужно было не только сверлить отверстия, но и их металлизировать, принимались меры для создания проводящего подслоя в отверстиях, но не на поверхности платы. Для этого перед сверлением плату покрывают защитной «лаковой рубашкой», сверлят через нее отверстия

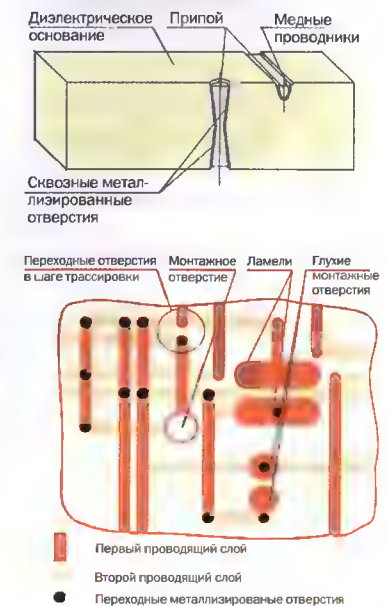


Рис. 1.12. Элементы конструкций рельефных плат

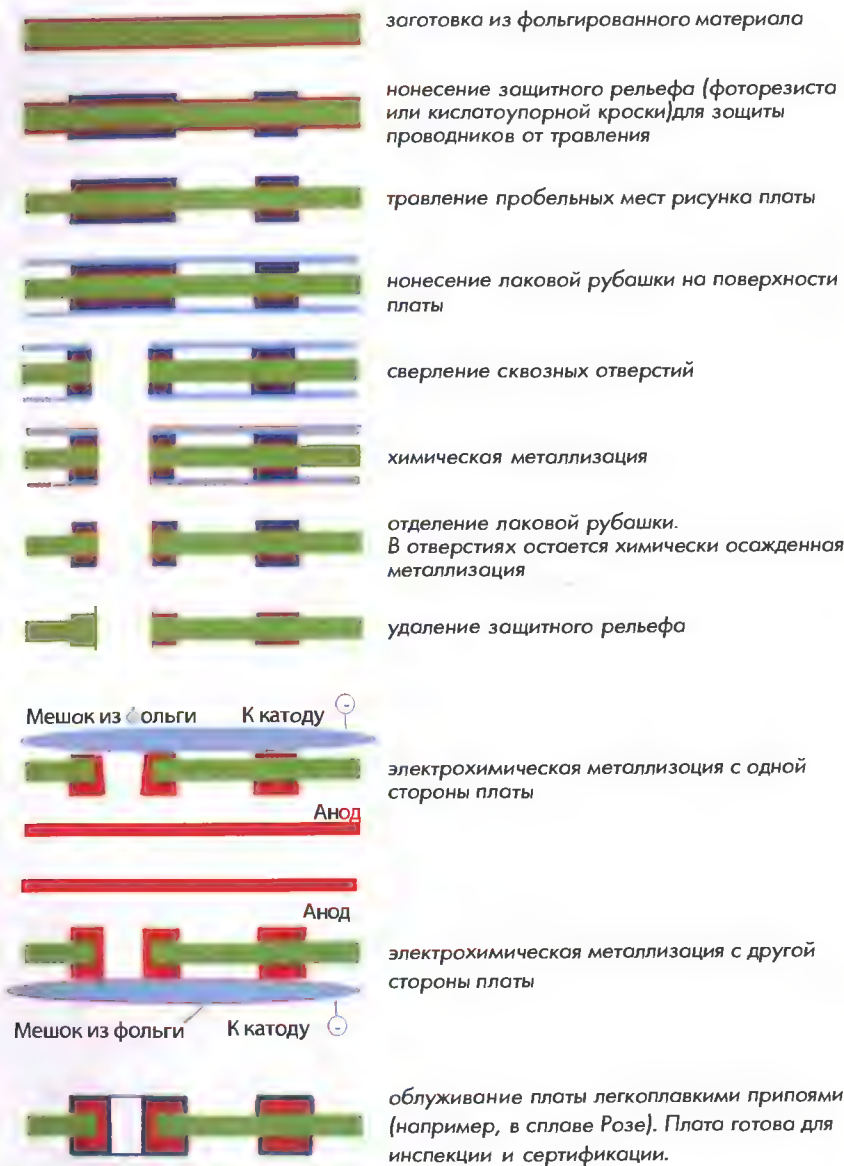


Рис. 1.13. Схема процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

и химически металлизуют всю заготовку. Лаковую рубашку наносят так, чтобы она легко отслаивалась, и после ее удаления химически осажденный металл остается только в отверстиях. Поскольку рисунок схемы уже вытравлен, металлизированные отверстия, подлежащие электрохимической металлизации, не имеют электрического соединения с катодом гальванической ванны. Его создают или проводом, нанизывая на него все отверстия платы, или мягкими проводящими подушками, поддуваемыми воздухом или наполняемыми водой для надежного электрического контактирования по всей поверхности заготовки. Естественно, что подушки могут располагаться только с одной стороны платы, оставляя другую открытой для электролита металлизации. Чтобы обеспечить равномерность металлизации отверстий, в процессе осаждения заготовки меняют сторонами. Схема процесса комбинированного негативного метода изготовления печатных плат показана на

Недостатки метода:

- при металлизации отверстий открытые участки диэлектрического основания насыщаются химическими растворами и получают за счет этого повышенную проводимость. Надежность изоляции, реализуемая этим методом, — низкая; для гальванической металлизации отверстий возникают большие затруднения для организации электрического контакта стенок отверстий с катодом гальванической ванны. Это обуславливает наличие заметного количества непрокрытых или плохо покрытых отверстий;
- при отделении лаковой рубашки возможно частичное разрушение проводящего подслоя в отверстиях. Условия для электрохимической металлизации нарушаются.

В связи с этим негативный метод уступил в распространении позитивному.

1.4.4.2. Комбинированный позитивный метод

Как уже отмечалось, единственным преимуществом негативного метода на ранних стадиях развития производства печатных плат с металлизированными отверстиями являлась возможность сверления отверстий по сформированному рисунку печатной платы, когда контактные площадки можно было использовать как мишень для ручного сверления отверстия. С появлением высокопроизводительных сверлильных станков с ЧПУ это единственное преимущество негативных методов исчезло.

В позитивном методе травление рисунка происходит после металлизации отверстий, а для соединения металлизированных отверстий с катодом используется еще не вытравленная фольга, изначально присутствующая на поверхности заготовки.

Схема комбинированного позитивного метода изготовления двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями:

- нарезка технологических заготовок;
- очистка поверхности фольги (дезоксидация);
- сверление отверстий, подлежащих металлизации, на станках с ЧПУ;
- активация поверхностей под химическую металлизацию;
- тонкая химическая металлизация (до 1 мкм);
- предварительное тонкая гальваническая металлизация (до 6 мкм) — «гальваническая затяжка»;
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон — позитив;
- основная гальваническая металлизация (до 25 мкм внутри отверстий);
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков фольги;
- удаление металлорезиста;
- нанесение контактных покрытий на концевые печатные ламели;
- тщательная отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишных покрытий под пайку;
- нанесение маркировочных знаков;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы — сертификация.

Преимущества:

- возможность воспроизведения всех типов печатных элементов с высокой степенью разрешения;
- защищенность фольгой изоляции от технологических растворов — хорошая надежность изоляции;
- хорошая прочность сцепления (адгезия) металлических элементов платы с диэлектрическим основанием.

Недостатки:

- относительно большая глубина травления (фольга + металлизация затяжки) создает боковой подтрав, ограничивающий разрешающую способность процесса;
- травление рисунка по металлорезисту ограничивает свободу выбора травящих растворов;
- после травления рисунка схемы, металлорезист или осветляют для улучшения паяемости, или удаляют и, после нанесения паяльной маски, осаждают финишные покрытия под пайку. Оба варианта требуют дополнительных капитальных затрат и прямых расходов.

1.4.4.3. Тентинг-метод

Процесс изготовления плат комбинированным позитивным методом становится короче и дешевле, если для защиты рисунка от травления использовать не металлорезист, а прочный, сухой пленочный фоторезист. Главная проблема тентинг-процесса — надежно закрыть отверстия от доступа травящих растворов. Не все пленочные фоторезисты способны к этому. Но, когда они появились, тентинг-метод начал успешно применяться для изготовления плат невысокой сложности.

Название процесса произошло именно потому, что пленка фоторезиста накрывает отверстия, как бы зонтиком или крышей, отсюда английское происхождение термина «tenting».

Преимущества тентинг-метода:

- меньшие капитальные затраты на оснащение производства относительно классических комбинированных методов;
- относительно меньшие прямые расходы за счет отсутствия необходимости осаждения и удаления металлорезиста.

Недостатки:

меньшая разрешающая способность метода за счет необходимости более глубокого травления рисунка: фольга + гальванически осажденная медь;

меньшая трассировочная способность за счет увеличенного размера контактных площадок под отверстия с целью надежного перекрытия отверстий фоторезистом.

1.4.5. Выбор методов изготовления печатных плат

Разнообразие методов изготовления печатных плат ставит нас перед необходимостью выбора схемы процесса с целью воспроизведения рисунка заданного класса точности. Для такого выбора можно руководствоваться рядом критериев, оговоренных в ГОСТ 23751. Попытаемся оценить возможности наиболее распространенных схем производства, исходя из одного из критериев: точности воспроизведения рисунка — проводника и зазора. Рассмотрим четыре базовых схемы:

- тентинг-метод с прямой металлизацией;
- комбинированный позитивный метод с прямой металлизацией;
- комбинированный позитивный метод с химической металлизацией;
- полуаддитивный метод с дифференциальным травлением.

Принципиальная разница между этими процессами — толщина вытравливаемого металла.

Принцип оценки точности воспроизведения проводника и зазора (П/З).

Будем считать, что разрешение фоторезиста (РФ) сравнимо с $4/3$ его толщины:

$$РФ = \frac{4}{3} \cdot F \quad (2.1)$$

Предположим, что величина вытравливаемого металла равна H . Известно, что величина подтравливания (ВП) рисунка сравнима

с $\frac{2}{3} \cdot H$ глубины травления:

$$ВП = \frac{2}{3} \cdot H \quad (2.2)$$

Исходя из этого, можно, эмпирически получить формулу для оценки воспроизведения ширины зазора (З):

$$З = РФ + 2 \cdot ВП \quad (2.3)$$

$$З = \frac{4}{3} \cdot F + 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot H = \frac{4}{3} \cdot (F + H) \quad (2.4)$$

Следуя из необходимости обеспечения равнопрочности проводников и зазоров, их, как правило, выполняют равными по ширине. Поэтому, вытравив тонкие зазоры, можно с уверенностью сказать, что проводники могут быть воспроизведены, по крайней мере с той же шириной и, тем более, с большей. Таким образом, для оценки воспроизведения тонких проводников достаточно оценить ширину зазора.

Приведем пример численной оценки воспроизводимости зазора $З$ для тентинг-метода.

Для тентинг-метода вынуждены использовать толсто пленочные фоторезисты (порядка 50 мкм), чтобы после проявления они смогли выдержать напор струй травящих растворов.

Для уменьшения глубины травления в тентинг-методе используется фольгированный диэлектрик с толщиной фольги 18 мкм. После гальванического наращивания примерно 35 мкм меди на поверхности, толщина вытравливаемого металла будет:

$$H = 18 \text{ мкм} + 35 \text{ мкм} = 53 \text{ мкм};$$

Используя формулу (2.1), получим разрешение фоторезиста:

$$РФ = \frac{4}{3} \cdot 50 \text{ мкм} \approx 67 \text{ мкм}$$

Используя формулу (2.2), получим величину подтравливания:

$$ВП = \frac{2}{3} \cdot 53 \text{ мкм} \approx 35 \text{ мкм}$$

Используя формулу (2.3), получим величину ширины зазора :

$$З = РФ + 2 \cdot ВП = 67 \text{ мкм} + 2 \cdot 35 \text{ мкм} = 137 \text{ мкм} \approx 0.14 \text{ мм}$$

Исходя из этого, можно утверждать, что при использовании тентинг-метода трудно ожидать воспроизводимость рисунка (П/З) лучше, чем 0.14/0.14 мм.

В таблице 1.2 указаны величины П/З при разных толщинах фольги:

Таблица 1.2. Параметры воспроизводимости рисунка при использовании тентинг-процесса

№	Толщина фольги, мкм	Толщина гальванического наращивания, мкм	П/З, мм
1	70	40	0,20/0,20
2	35	35	0,16/0,16
3	18	30	0,13/0,13
4	9	25	0,11/0,11

Комбинированный позитивный метод (КПМ) позволяет воспроизводить более тонкие проводники за счет меньшей толщины вытравливаемого металла. Толщина используемых в этом методе фоторезистов определяется лишь тем, что толщина рельефа должна быть больше толщины наращиваемой в этом рельефе металлизации (проводников). Как правило, используют сухой пленочный фоторезист толщиной порядка 40 мкм. При расчете глубины травления приходится учитывать толщину гальванической затяжки порядка 6 мкм.

В таблице 1.3 указаны величины П/З при разных толщинах фольги:

Таблица 1.3. Параметры воспроизводимости рисунка при использовании КПМ

№	Толщина фольги, мкм	П/З, мм
1	35	0,1
2	18	0,08
3	9	0,07

Нужно принять во внимание, что при травлении меди по металлорезисту включается в работу гальваническая пара медь-металлорезист (олово-свинец), и подтравливание может оказаться несколько больше. Но использование современных машин с интенсивным однонаправленным струйным травлением с большим напором струй может нейтрализовать это явление.

Таблица 1.4. Результаты сопоставления методов изготовления печатных плат по воспроизводимости рисунка.

Полуаддитивный метод с дифференциальным травлением – Pattern Plating	Комбинированный позитивный метод с прямой металлизацией – Pattern Plating	Традиционный комбинированный позитивный метод с химической металлизацией и гальванической затяжкой – Pattern Plating	Тентинг-метод с общей металлизацией поверхности заготовки (панели) – Panel Plating	Слой
				Фольга
	18 мкм	18 мкм	18 мкм	
				Создание проводимости < 1 мкм
3 мкм		6 мкм		Общая металлизация поверхности
			35 мкм	
30 мкм	40 мкм	40 мкм	50 мкм	Фоторезист
				Металлизация рисунка
25 мкм	35 мкм	35 мкм		
	15 мкм	15 мкм		Металлорезист
3 мкм	18 мкм	24 мкм	53 мкм	Глубина травления меди
0,04/0,04	0,075/0,075	0,085/0,085	0,13/0,13	Проводник/зазор
2...3	1,2...1,3	1,3...1,4	1,0	Относительная стоимость основного производства
8...10	3...4	2...3	1	Относительная стоимость инженерного обеспечения
2	1,1	1,2	1	Относительный объем прямых издержек

Полуаддитивный метод с дифференциальным травлением позволяет воспроизводить еще более тонкие проводники, чем все вышеуказанные методы. Это связано с тем, что в этом методе используется нефольгированный диэлектрик, на который осаждают минимальный слой меди для того, чтобы была возможна дальнейшая металлизация проводников и отверстий. И так как при травлении вытравливается только этот минимальный слой (порядка 3 мкм), то величина подтравов минимальна (≤ 2 мкм), что позволяет воспроизводить проводники малой ширины. В этом случае, воспроизведение рисунка определяется преимущественно толщиной используемого фоторезиста. В свою очередь, его толщина должна создать рельеф для металлизации, чтобы она не «выплескивалась» за границы трассы. Поэтому и в этом методе вынуждены использовать относительно «толстый»

фоторезист с толщиной порядка 30 мкм. Таким образом, величина $P/3$ для этого метода определяется разрешением фоторезиста и может составлять 0,04/0,04 мм.

В таблице 1.4, собраны характеристики воспроизведения рисунка для рассмотренных методов с указанием толщин фольги, наращиваемого металла, фоторезиста и металлорезиста. Дана оценка величины $P/3$, а также стоимости создания производства для изготовления печатных плат одним из четырех способов. Оценки стоимости приведены в относительных единицах. За единицу принята стоимость основного и вспомогательного производства для изготовления печатных плат по тентинг-технологии.

1.5. Методы изготовления многослойных печатных плат

1.5.1. Введение

Методы изготовления многослойных печатных плат (МПП) постоянно эволюционируют, при этом явно наблюдается гегелевская диалектика развития по спирали: возврат к старому в новом качестве. Так метод послойного наращивания, уступивший в свое время первенство методу металлизации сквозных отверстий, вернулся как способ наращивания слоев с глухими отверстиями. А метод попарного прессования можно увидеть как фрагмент изготовления МПП со скрытыми межслойными переходами. Поэтому описание прежних методов изготовления МПП, это не просто дань уважения истории техники, а возможность возврата к ним в новых комбинациях. Мало того, в ряде успешно функционирующих электронных систем эти методы до сих пор присутствуют, и никто не собирается их менять нет повода.

Что касается новых методов, то они неизбежно будут продвигаться вслед за интеграцией элементной базы, увеличением функциональности аппаратуры, уменьшением ее габаритов и массы. Если рассматривать эту проблему с позиций российской действительности, то вслед за потерей темпов развития российской микроэлектроники можно потерять всю отечественную электронную индустрию, если допустить отставание в высоких тех-

нологиях печатных плат. Поэтому в этот раздел включены и перспективные методы, и схемы изготовления МПП, уже обсуждающиеся мировой общественностью технологов печатных плат.

1.5.2. Метод попарного прессования

Этот метод изготовления многослойных печатных плат основан на выполнении межслойных соединений посредством металлизации отверстий по типу обычных двусторонних печатных плат. Структура МПП, реализуемая этим методом, показана на рис. 1.17. Для изготовления МПП используются две заготовки из двустороннего фольгированного диэлектрика. На одной стороне каждой заготовки фотохимическим способом изготавливаются схемы внутренних слоев — второго и третьего. Затем сверлятся и металлизируются отверстия межслойных переходов, со второго на первый и с третьего на четвертый слой. При электрохимической металлизации переходных отверстий, для электрического соединения с катодом ванны используется целиковая фольга будущих наружных слоев. Заготовки с готовыми внутренними слоями платы спрессовываются. Выдавленная при прессовании смола заполняет переходные отверстия, защищая, тем самым, их медное гальванопокрытие от химического воздействия последующих технологических операций, в том числе от травления. После прессования заготовка МПП обрабатывается так же, как двусторонняя печатная плата, — позитивным комбинированным методом с получением металлизированных отверстий и печатных проводников на наружных слоях. Нужно отметить, что наружный слой МПП попарного прессования дважды подвергается металлизации: при осаждении меди в переходные отверстия и при металлизации сквозных отверстий, соединяющих наружные слои. Поэтому толщина меди наружных слоев, считая и медную фольгу, достигает 130—160 мкм. Это резко снижает решающую способность печатного рисунка наружных слоев, так как травление меди значительной и неравномерной толщины не обеспечивает необходимого качества и плотности печатного рисунка. Кроме того, при защите печатных узлов покровными лаками создаются значительные затруднения в получении плотного защитного покрытия: лак стекает с высоких проводников, обнажая их острые кромки.



Рис. 1.17. Структура МПП попарного прессования: 1 — переходное металлизированное отверстие между наружным и внутренним слоем; 2 — сквозное металлизированное отверстие; 3 — проводник наружного слоя; 4 — проводник внутреннего слоя.

Методом попарного прессования можно изготовить МПП с числом слоев не более четырех, что не всегда позволяет получить необходимую плотность монтажа.

Преимущества метода является относительная простота реализации, поскольку он основан на обычной технологии металлизации отверстий двусторонних печатных плат, хорошо освоенной в промышленности. Однако прессование заготовок при недостаточной жесткости исходного материала может приводить к разрушению металлизации переходных отверстий, следовательно, к отказам соединений.

1.5.3 Метод открытых контактных площадок и выступающих выводов

Сущность обоих методов заключается в прессовании тонких печатных слоев с перфорированными окнами для доступа к внутренним слоям. Межслойные соединения, как таковые, в этих методах изготовления отсутствуют. Поэтому проводники, принадлежащие одной цепи, должны лежать в одном слое.

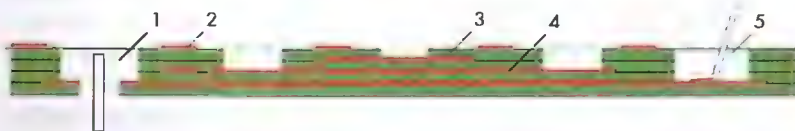


Рис. 1.18. Структура МПП, изготовленной методом открытых контактных площадок: 1 — окно для пайки штыревого вывода компонента; 2 — проводник внешнего слоя; 3 — проводник внутреннего слоя; 4 — соединение монтажных площадок в одном слое; 5 — окно для монтажа планарного вывода компонента.

При изготовлении МПП методом открытых контактных площадок используются полученные травлением отдельные печатные слои. Соединения выводов навесных элементов с контактными площадками внутренних слоев осуществляются через перфорированные окна вышележащих слоев, как показано на рис. 1.18. В результате этого верхний слой имеет перфорации, обеспечивающие доступ ко всем нижним слоям. Очевидно, нижний внутренний слой имеет наибольшую площадь для трассировки печатных цепей, поскольку не имеет перфораций, а верхний наружный слой имеет наименьшую площадь для трассировки и наибольшее количество перфорации. Таким образом, при использовании метода открытых контактных площадок плотность печатного рисунка внутренних слоев имеет ограничения, связанные с необходимостью перфораций для осуществления соединений. Поэтому увеличение слойности МПП, изготавливаемых методом открытых контактных площадок, более пяти становится не целесообразным. Такие ограничения отсутствуют для метода выступающих выводов.

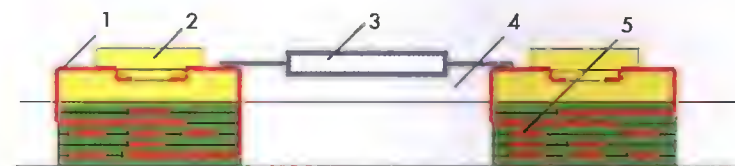


Рис. 1.19. Структура МПП, изготовленной методом выступающих выводов: 1 — переход печатного проводника внутреннего слоя в монтажную площадку; 2 — крепящая колодка; 3 — компонент с планарными выводами; 4 — окно платы; 5 — проводник внутреннего слоя.

Фольгирование перфорированной стеклоткани внутренних слоев при изготовлении МПП методом выступающих выводов производится самим изготовителем платы, так как выступающие выводы являются продолжением печатных проводников и выходят из внутренних слоев в перфорированные окна. После склеивания пакета внутренних слоев выступающие в окна выводы отгибают на наружную поверхность платы и формируют под крепящую колодку, как показано на рис. 1.19, либо подпаивают к контактными площадкам наружного печатного слоя. Окна в плате предназначены для размещения микросхем. Из каждого окна должны выходить концы проводников в количестве, равном числу выводов микросхем.

Оба этих метода отличаются простотой и сравнительно коротким технологическим циклом. Однако необходимость формовки выводов радиоэлементов на различную глубину и пайка в перфорированные окна повышают трудоемкость монтажных операций для метода открытых контактных площадок. Кроме того, при этом методе существует ограничение на число слоев (не более 5...7), так как большее их число увеличивает глубину перфорации, что делает пайку открытых контактных площадок ненадежной.

В отличие от других методов, метод выступающих выводов не имеет каких-либо ограничений по максимальному количеству слоев. Но сосредоточение печатных проводников в узких переплетах перфорированных окон создает большие перекрестные помехи и, тем самым, ограничивает трассировочные возможности печатных узлов. Наряду с этим недостатком, следует принять во внимание затруднения в формовке и закреплении выступающих выводов на поверхности платы в пределах периметра окна.

1.5.4. Метод послойного наращивания

Изготовление МПП этим методом заключается в последовательном чередовании слоя изоляции и металлизированного слоя печатного рисунка. Соединения между проводящими элементами печатных слоев производятся гальваническим наращиванием меди в отверстиях слоя изоляции. Типичная структура МПП, реализуемая этим методом, показана на рис. 1.20.

Изготовление платы начинается с приклейки к медной фольге изоляционной прокладки с перфорациями в местах будущих межслойных переходов. На всех операциях изготовления МПП методом послойного наращивания эта фольга осуществляет соединение металлизировемых поверхностей с катодом гальванической ванны. На конечном этапе на ней вытравливают рисунок наружного слоя.

После изготовления металлизированных переходов и их планаризации в плоскость с диэлектриком, на поверхность межслойной изоляции полуаддитивным методом формируют печатный рисунок слоя. На изготовленный слой проводящего рисунка напрессовывают следующий слой перфорированной изоляции и через перфорации наращивают очередные металлизированные переходы. Таким образом, последовательно создаются слои проводящего рисунка и изоляции с межслойными переходами.

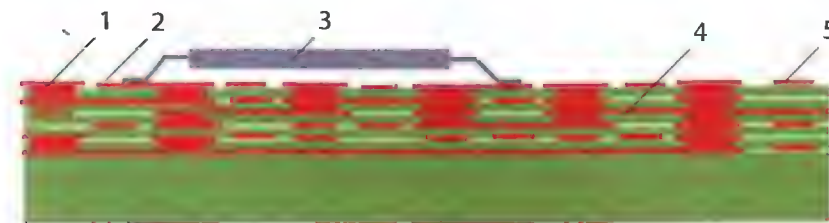


Рис. 1.20. Структура МПП послойного наращивания: 1 — межслойный переход — металлизированный столбик; 2 — монтажная контактная площадка; 3 — компонент с планарными выводами; 4 — проводник внутреннего слоя; 5 — проводник внешнего слоя.

В качестве межслойной изоляции могут быть использованы стеклотекстолитовые прокладки с перфорациями в местах межслойных переходов или полимерные пленки, отверстия в которых химически вытравливают в назначенных местах.

Количество слоев МПП при послойном наращивании ограничивают обычно пятью, так как изготовление каждого последующего слоя связано с многократными термическими (при прессовании) и химическими воздействиями на уже изготовленные слои.

Преимуществом данного метода изготовления МПП является исключительно высокая плотность монтажа, так как он дает возможность выполнения межслойных переходов в любой точке платы, независимо от трассировки и местоположения межслойных соединений смежных слоев. Таким образом, межслойные переходы могут выполняться независимо друг от друга, между любыми слоями в любой назначенной точке.

Ввиду необходимости строгой последовательности выполнения операций, процесс изготовления МПП методом послойного наращивания имеет длительный технологический цикл. Кроме того, этот процесс требует исключительной тщательности и качества изготовления, так как любой производственный дефект, допущенный на последних слоях, приводит к браку всей печатной платы. Использование этого метода для изготовления МПП создает дополнительные технологические трудности при очистке отверстий под межслойные переходы от затеков клея, последующего тщательного визуального контроля каждого отверстия на отсутствие загрязнений, сошлифовывания вручную выступающих над поверхностью

заготовки столбиков меди межслойных соединений до уровня поверхности изоляции и др.. Попытки в какой-то мере механизировать эти операции, как правило, не приводят к положительному эффекту. Особенности гальванических осадений в толстых слоях и длительный контакт электролитов с открытой поверхностью диэлектриков приводят к необходимости постоянной тщательной очистки электролитов и предотвращения попадания в ванну даже незначительных загрязнений, которые потом могут вызвать отказ соединений по межслойному переходу. Для обеспечения постоянных условий металлизации необходимо более часто, чем для других случаев, производить химический анализ, корректировку и очистку растворов ванн.

Трудности послойного наращивания в сочетании с высокой реализуемой плотностью монтажа и надежностью выделили этот метод для изготовления уникальных МПП в лабораторном производстве с высокой технологической культурой. Внедрение этого метода в серийное и даже в мелкосерийное производство затруднено.

Применение этого метода оправдано для создания аппаратуры с высокой надежностью. Например, печатные платы в аппаратуре космического транспорта и космического базирования, изготовленные этим методом, не имели ни одного отказа за все время использования с 80-х годов прошлого столетия.

1.5.5. Метод металлизации сквозных отверстий

Процесс изготовления МПП методом электрохимической металлизации сквозных отверстий состоит в изготовлении отдельных внутренних слоев химическим методом, прессовании слоев в монолитный пакет, сверлении сквозных отверстий и их металлизации. При сверлении на стенках отверстий вскрывают торцы контактных площадок внутренних слоев. Соединения их друг с другом и с контактными площадками наружных слоев получают за счет металлизации отверстий.

Типичная структура МПП, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий, показана на рис. 1.21. Поскольку все отверстия в плате являются сквозными, плотность межсоединений несколько ограничена, так как каждое отверстие используется для внутреннего соединения только один раз и в то же время занимает определенную площадь на каждом слое, ограничивая свободу трассировки печатных цепей. Вводя промежуточные внутренние соединения или сквозные отверстия для групп слоев, как это схематически показано на рис. 1.22, межслойные соедине-

ния можно располагать друг над другом или только между теми слоями, где они нужны, не ограничивая трассировку печатных цепей на других слоях. Изготовление МПП по схемам, представленным на рис. 1.22, обеспечивает наибольшую свободу в выборе месторасположения внутренних соединений и путей трассировки печатных проводников, следовательно, позволяет получить максимальную плотность межсоединений.

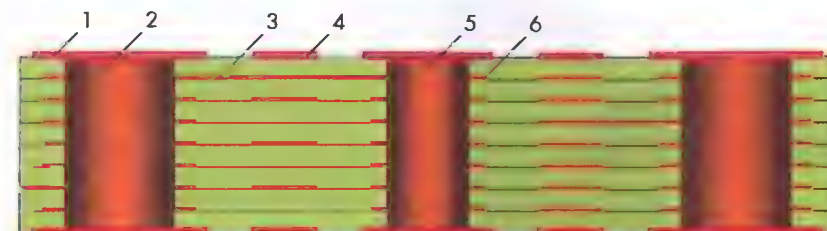


Рис. 1.21. Структура МПП, изготовленной классическим методом металлизации сквозных отверстий: 1 — контактная площадка внешнего слоя; 2 — сквозное монтажное металлизированное отверстие; 3 — проводник внутреннего слоя; 4 — проводник внешнего слоя; 5 — сквозное переходное металлизированное отверстие; 6 — контактная площадка внутреннего слоя.

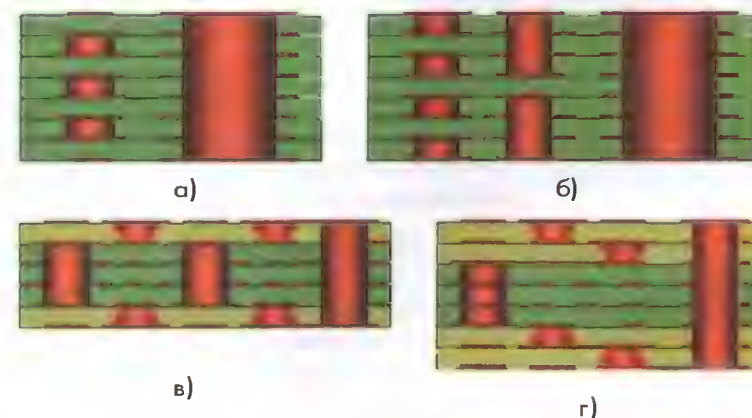
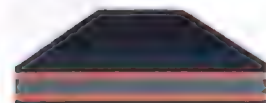


Рис. 1.22. Многоуровневые межсоединения в МПП: а) двухуровневые; б) трехуровневые; в) трехуровневые с глухими отверстиями; г) четырехуровневые с глухими отверстиями.



ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ

Это заготовка внутреннего слоя многослойной печатной платы, вырезанная из листа тонкого фольгированного диэлектрика. Диэлектрическое основание – стекло-эпоксидная композиция: стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой. Медная фольга имеет толщину: 18 мкм – для внешних слоев, 35 мкм – для внутренних слоев, 70 мкм – для внутренних слоев земли и питания.



НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Нанесение фоточувствительного материала (фоторезиста) на заготовку. Как правило, это пленочный фоторезист, наслаиваемый на заготовку специальным валковым устройством – ламинатором. Поверхность заготовки очищается для обеспечения адгезии фоторезиста. Этот этап проходит в чистой комнате с неактивным (желтым) освещением. Фоторезист светочувствителен к ультрафиолетовому спектру.



СОВМЕЩЕНИЕ ФОТОШАБЛОНА-НЕГАТИВА

С заготовкой совмещается фотошаблон. Круг, часть которого изображен, – контактная площадка, в которой впоследствии будет сверление. Изображение на фотошаблоне негативное по отношению к будущей схеме. Под прозрачными участками фотошаблона медь не будет удалена.



ЭКСПОНИРОВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Участки поверхности, прозрачные на фотошаблоне, засвечиваются. Засвеченные участки фотополимеризуются и теряют способность к растворению. Фотошаблон снимается.



ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Изображение на фоторезисте проявляется: не засвеченные участки растворяются, засвеченные фотополимеризуются и остаются на плате, потеряв способность к растворению. В результате фоторезист остается только в тех областях, где будут проходить проводники платы. Таким образом, на плате остается позитивное изображение топологии схемы. Назначение фоторезиста – избирательно защитить медь от травления.

Рис. 1.23. Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий



ТРАВЛЕНИЕ РИСУНКА СХЕМЫ

Заготовка травится для удаления меди из пробельных мест (зазоров). Фоторезист, оставшийся на поверхности, предохраняет медь от травления. Вся незащищенная медь удаляется, вскрывая диэлектрическую подложку. После травления на слое остаются печатные проводники.



УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА (СТРИП-ПРОЦЕСС)

Фоторезист удаляется с поверхности проводников. Теперь заготовка представляет собой полностью готовый внутренний слой. В нашем примере она будет вторым или третьим слоями будущей платы.



ПРЕССОВАНИЕ СЛОЕВ В МНОГОСЛОЙНУЮ СТРУКТУРУ

На этом этапе слои многослойной платы совмещаются по базам и прокладываются склеивающими листами (pre-preg). Склеивающие листы – стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой в полутвержденном состоянии. Пакет слоев укладывается в пресс, где подвергается воздействию высокой температуры и давления. Смола склеивающих прокладок плавится и отверждается, происходит склеивание слоев МПП в монолит.



СВЕРЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ

В плате высверливаются отверстия на специализированных станках с ЧПУ. Совмещение просверленных отверстий с контактными площадками рисунка слоев существенно. Оно обеспечивается точностью позиционирования на всех этапах изготовления МПП.

При сверлении в зоне резания развиваются высокие температуры (до 350°C), смола плавится и загрязняет торцы контактных площадок внутренних слоев (нанос смолы).

Рис. 1.23. Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий



ОЧИСТКА ОТВЕРСТИЙ ОТ НАНОСА СМОЛЫ (DESMEAR)
Отверстия платы очищаются от наноса смолы на медные торцы контактных площадок внутренних слоев. Без этой очистки соединение металлизации отверстия с внутренними слоями будет ненадежным. Варианты способов очистки: травление в серной кислоте, в растворе перманганата, плазмохимическая очистка, гидроабразивная обработка.



ХИМИЧЕСКОЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ МЕДИ (АЛЬТЕРНАТИВА – ПРЯМАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ)
Этот этап нужен для придания проводимости стенкам отверстий, необходимой для последующей гальванической металлизации. Рыхлый слой химически осажденной меди быстро разрушается, поэтому его усиливают тонким слоем гальванической меди. Для химической металлизации появилась альтернатива – прямая металлизация, при которой стенки отверстий покрываются очень тонким слоем палладия. Тогда химическая и предварительная гальваническая металлизация не требуются.



НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА
Плата покрывается фоторезистом. Фоторезист засвечивается через фотошаблон-позитив, засвеченные участки удаляются. Этот процесс позитивный, т.е. фоторезист удаляется с участков, где будут проводники и отверстия, на стенки которых будет наноситься медь. Поэтому изображение на фотошаблоне – позитивное. Остаточный на плате рельеф фоторезиста – негатив.



ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ (ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ) ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ
Медь наносится на поверхность стенок отверстий до толщины 25 мкм. Только при такой толщине металлизация обеспечивает необходимую прочность при термодинамических нагрузках, свойственных последующим пайкам. При металлизации отверстий неизбежно металлизуются поверхности проводников внешних слоев.

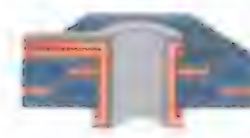
Рис. 1.23. Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий



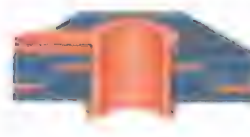
ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗИСТА (КАК ПРАВИЛО, ОЛОВЯННО-СВИНЦОВОЕ ПОКРЫТИЕ)
Металлорезист служит защитой проводников и металлизированных отверстий от травления. Это, во-первых. Во-вторых, он защищает медь от окисления. В-третьих, он необходим для длительного сохранения способности платы к пайке, если он остается как финишное покрытие. Если в качестве металлорезиста используется гальванический сплав олова-свинца, он может быть оплавлен для получения металлургического сплава, длительно сохраняющего способность к пайке.



УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА
Фоторезист удаляется, оставляя металлорезист на проводниках и в отверстиях, и обнажает медь в проблемных местах (зазорах). Медь, покрытая металлорезистом, останется не вытравленной и формирует топологию внешних слоев платы (МПП).



ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ НА ВНЕШНИХ СЛОЯХ
На этом этапе металлорезист защищает медь от травления. Незащищенная медь растворяется в травящем растворе, оставляя на плате рисунок будущей схемы. Если в качестве металлорезиста используется олово-свинец и на плату в последующем наносится паяльная маска, его приходится удалять (стравливать). Иначе он расплавится под маской при групповом нагреве в процессах пайки и создаст под маской опасные пазухи. Если паяльная маска в дальнейшем не предусматривается, на этом этапе плата – законченный продукт производства. Тогда гальванический сплав олово-свинец или осветляют и/или оплавливают, поскольку травящие растворы окисляют его поверхность.



УДАЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗИСТА ОЛОВО-СВИНЕЦ
Если конструкцией предусматривается нанесение паяльной маски и в качестве металлорезиста используется олово-свинец, припой удаляется с поверхности меди в соответствующих травителях.

Рис. 1.23. Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий



НАНЕСЕНИЕ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ

Для защиты поверхности платы наносится паяльная маска – электроизоляционное нагревостойкое покрытие. Существует несколько типов масок и методов ее нанесения. Фоточувствительные композиции могут быть жидкими и пленочными. Тогда маска наносится и обрабатывается методами фотолитографии, т.е. теми же способами, что и фоторезист. Этот процесс обеспечивает высокую точность совмещения. Способ трафаретной печати не обладает такой точностью, но этот процесс более производителен в массовом производстве.



ОБЛУЖИВАНИЕ МОНТАЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ – HAL-процесс (Hot Air Leveling – выравнивание горячим воздухом)

Открытые маской участки меди (монтажные отверстия, контактные площадки) облуживаются горячим припоем методом погружения. Чтобы не оставлять на плате натеков припоя и освободить отверстия от припоя, плата при изъятии из ванны облуживания обдувается горячими воздушными ножами. Кроме сдувания излишков воздушные ножи выравнивают припой на поверхностях контактных площадок и монтажных отверстий. Теперь плата готова для заключительных этапов: нанесения надписей (трафаретная печать или фотолитография), обрезки по контуру, тестирования и упаковки.

Рис. 1.23. Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

Технологический процесс изготовления МПП по этим вариантам, в тех случаях усложняется, но, тем не менее, это оказывается оправданным, когда другие способы уплотнения монтажа приводят к еще большим технологическим трудностям.

Схема технологического процесса изготовления многослойных печатных плат методом металлизации сквозных отверстий показана на рис. 1.23.

Метод металлизации сквозных отверстий, по-существу единственный метод создания конструкций с наиболее оптимальной электрической структурой, обеспечивающей надежную передачу наносекундных импульсов и распределение питания между активными элементами. Такие конструкции МПП позволяют выполнить печатные цепи как полосковые линии передач и создают эффективное экранирование одной группы цепей от другой. Показанная для примера на рис. 1.24 типичная структура 8-слойной МПП содержит 4 сигнальных слоя и 2 слоя питания. Цепи сигнальных слоев имеют ортогональное расположение печатных проводников, т.е. преимущественное направление вдоль одной из осей координат: X или Y. Слои питания представляют собой целиковую фольгу или металлическую сетку с освобождениями в местах сквозных металлизированных отверстий. В точках соединения металлизированного отверстия с цепью внутреннего слоя выполняют контактную площадку. Слои питания одновременно выполняют роль электрических экранов.

Слой	Функции:	Материал	Толщина, мм
1	M1	Фольга	0,018
		Препрег 2113 2	0,19 0,02
2, 3	X1-Y1	Стекло-текстолит FR-4	Основание: 0,51 0,05
		Препрег 7628 2	Фольга: 0,035 2
		Стекло-текстолит FR-4	0,36 0,03
4, 5	0 – U1	Препрег 7628 2	Основание: 0,51 0,05
		Стекло-текстолит FR-4	Фольга: 0,035 2
		Препрег 7628 2	0,36 0,03
6, 7	X2-Y2	Стекло-текстолит FR-4	Основание: 0,51 0,05
		Препрег 2113 2	Фольга: 0,035 2
		Препрег 7628 2	0,19 0,02
8	M2	Фольга	0,018
		ИТОГО:	2,9 0,25

Рис. 1.24. Типичная структура МПП (8 слоев): М – монтажные (внешние) слои; X – Y – сигнальные слои с ортогональной топологией трасс; U – слои питания; 0 – слои земли.

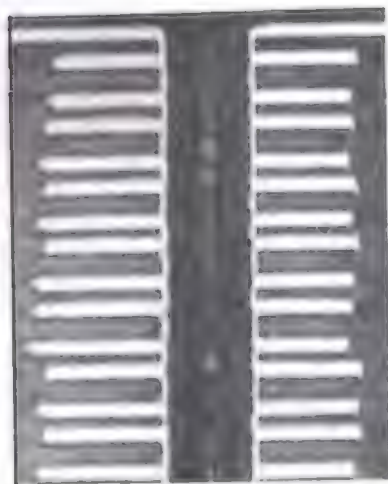


Рис. 1.25. Фрагмент микрошлифа сквозного металлизированного отверстия МПП.

На рис. 1.25 для иллюстрации реальной структуры МПП показан фрагмент микрошлифа сквозного металлизированного отверстия.

Таким образом, наряду с высокой технологичностью МПП, изготовленные методом металлизации сквозных отверстий, имеют высокую плотность монтажа, большое количество вариантов трассировки печатных цепей, более короткие линии свя-

зей, возможность электрического экранирования, улучшение характеристик, связанное с устойчивостью к воздействию окружающей среды за счет расположения всех печатных проводников в массе монолитного диэлектрика, возможность увеличения числа слоев без существенного увеличения стоимости и длительности процесса.

Недостатком метода является относительно механически слабая связь металлизации отверстий с торцами контактных площадок внутренних слоев. Изготовление МПП этим методом осложнено проблемой точного совмещения печатных слоев из-за погрешностей фотомасштабов и деформаций базовых материалов в процессе изготовления внутренних слоев и прессования. Особой тщательности требует подбор режимов прессования для обеспечения прочной адгезии пакета слоев, устойчивой к воздействию групповой пайки. И, наконец, в процессе использования МПП возникают трудности, при внесении изменений в трассировку при ремонте плат.

1.5.6. МПП с микропереходами

1.5.6.1. Обоснование необходимости

Для МПП со сквозными отверстиями характерен недостаток, состоящий в необходимости разделения контактных площадок, окружающих отверстия, и контактных площадок для присоединения выводов

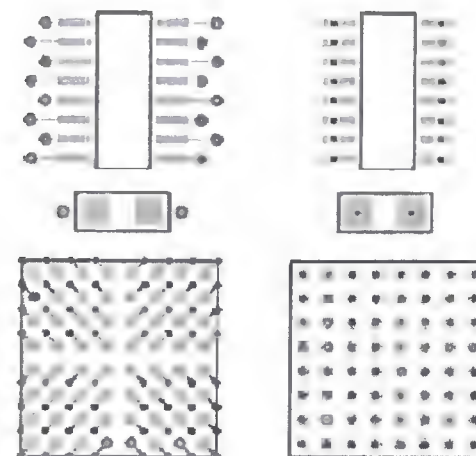


Рис. 1.26. Конструкции элементов присоединения со сквозными отверстиями (слева) и с микропереходами (справа) для планарных выводов (вверху) и шариковых выводов BGA (внизу).

компонентов. Это обусловлено утечкой припоя в сквозные отверстия, если контактные площадки, окружающие отверстия, используются для пайки.

На рис. 1.26 показано, как меняются конструкции элементов присоединения, когда МПП изготавливаются с микропереходами.

1.5.6.2. МПП со скрытыми микропереходами на наружных слоях

Схема изготовления МПП со скрытыми микропереходами показана на рис. 1.27. Можно увидеть, что в этой схеме есть подобие попарному прессованию. Отличие лишь в том, что металлизацию внешнего слоя защищают от осаждения, чтобы не создавать больших толщин меди на внешних слоях. Для этого отверстия в слое выполняют не сквозными, а глухими. Не трудно увидеть также, что высверлить глухое отверстие в тонком основании на заданную глубину, не порвав фольги, невозможно. Поэтому слой с микропереходами выполняют из фольгированного полиимида и отверстия вытравливают через перфорации фольги по местам, где должны быть отверстия.

Нужно сказать, что технология изготовления МПП со скрытыми микропереходами активно вытесняется методом послойного наращивания переходов на основание, изготовленное методом металлизации сквозных отверстий.



Рис. 1.27. МПП со скрытыми микропереходами

1.5.6.3. Комбинация методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания

Необходимость в дальнейшей миниатюризации электронной аппаратуры (мобильные телефоны, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, портативные охранные системы и т.п.) привела к созданию конструкций печатных плат с высокой плотностью межсоединений, что в международной документации называют HDI – High Density Interconnections. Схема этого метода представляет собой последовательность, состоящую из изготовления МПП, напрессовывания на нее последовательности слоев с микропереходами, как показано на рис. 1.28. Структуру таких плат обозначают количеством слоев МПП, изготавливаемых по классической технологии, и количеством послойно наращиваемых слоев с межслойными переходами. Например, структура «2 + 4 + 2» означает, что в качестве основы используется 4-слойная МПП, и на нее с двух сторон наращиваются по два слоя с микропереходами (см. рис. 1.22, г).

1.5.7. Гибкие печатные платы

Использование гибких диэлектрических материалов для изготовления печатных плат дает как разработчику, так и пользователю электронных устройств ряд уникальных возможностей. Это, прежде всего, — уменьшение размеров и веса конструкции, повышение эффективности сборки, повышение электрических характеристик, теплоотдачи и, в целом, надежности.

Если учесть основное свойство таких плат – динамическую гибкость – становится понятным все возрастающий объем применения таких плат в автомобилях, бытовой технике, медицине, в оборонной и аэрокосмической технике, компьютерах, в системах промышленного контроля и бортовых системах.

Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиимидной или лавсановой пленке и поэтому могут легко деформироваться, даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций гибких ПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе.

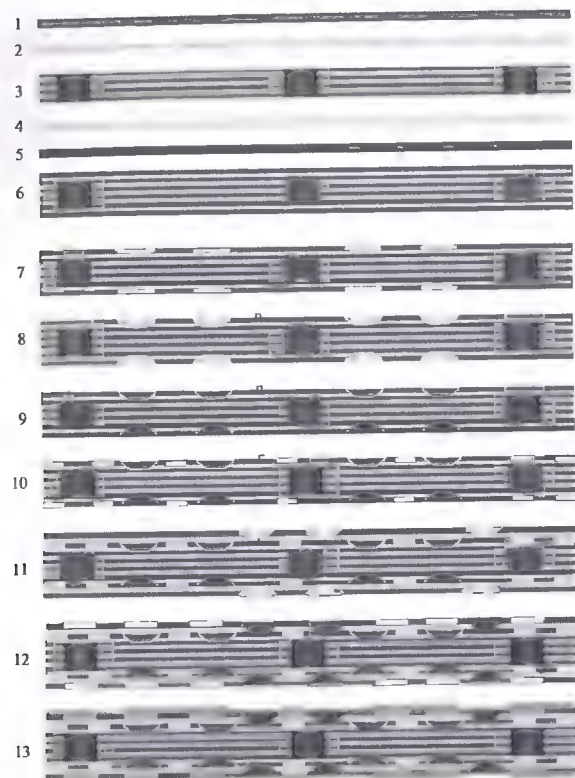


Рис. 1.28. Последовательность изготовления МПП с микропереходами: «2+4+2»: 1 — фольгированная полиимидная пленка; 2 — клеящая пленка; 3 — МПП: 4 слоя; 4 — клеящая пленка; 5 — фольгированная полиимидная пленка; 6 — фольгированные полиимидные пленки приклеены к МПП; 7 — фольга полиимидной пленки вытравлена по местам будущих глухих отверстий - микропереходов; 8 — в полиимидной пленке вытравлены глухие отверстия; 9 — глухие отверстия (микропереходы) металлизированы; 10 — на внешних слоях заготовки вытравлен рисунок; 11 — на внешние слои заготовки наклеены фольгированные полиимидные пленки и вытравлены глухие отверстия; 12 — глухие отверстия (микропереходы) внешних слоев МПП металлизированы, рисунок вытравлен; 13 — на внешние поверхности МПП нанесена защитная маска, на открытые монтажные поверхности нанесены финишные покрытия под пайку.

1.5.8. Выбор методов изготовления печатных плат

Правильный выбор материалов, технологических процессов и элементной базы при разработке современных печатных узлов во многом определяет уровень работоспособности и надежность электронного устройства в целом при рациональных экономических затратах в производстве. При этом рассматриваются следующие аспекты:

- **Назначение электронной системы:** технические условия на изделия, ожидаемый рабочий ресурс, элементная база с характеристиками по быстродействию, выходному сопротивлению, уровню рабочих сигналов, напряжению питания и т. д.

- **Эксплуатационные требования** по ремонтпригодности: возможности профилактики и ремонта, наличие запасных печатных узлов и блоков.

- **Окружающие условия при хранении и работе.** Технология изготовления: совместимость с действующим производством, степень и характер механизации и автоматизации при заданном объеме производства.

- **Базовые и вспомогательные материалы:** объем возможных поставок, стоимость, необходимость отбора по специальным требованиям.

Основным отличием, характеризующим возможности того или другого метода, можно считать реализуемую им плотность межсоединений. При этом необходимо иметь в виду практически возможное число монтажных точек на единицу площади поверхности платы. Например, для двусторонних печатных плат возможная плотность монтажа, рассчитанная теоретически, составляет 15 выводов/1 см² при разрешающей способности по ширине проводников и зазоров, равной 0,5 мм. Однако реальные предельные значения этой плотности, как правило, не превышают 2,8 выводов/см². Практическое ограничение плотности монтажа обусловлено в большей степени размерами элементов и специальными требованиями к электрическим параметрам печатных связей.

Все методы изготовления печатных плат можно расположить в следующий ряд возрастания плотности печатного монтажа:

- односторонние печатные платы;
- двусторонние печатные платы (ДПП) комбинированным позитивным методом;
- ДПП полуаддитивным методом;

- ДПП полуаддитивным методом с дифференциальным травлением;
- МПП методом попарного прессования;
- МПП методом открытых контактных площадок;
- МПП методом металлизации сквозных отверстий;
- МПП методом послойного наращивания;
- МПП комбинацией методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания.

Рассмотрение методов изготовления печатных плат с учетом современной практики печатного монтажа позволяет отдать предпочтение в производстве односторонних печатных плат — химическому методу, двусторонних — комбинированному позитивному, многослойных — методу металлизации сквозных отверстий. Названные методы признаны базовыми в отечественной и зарубежной практике производства печатных схем. Поэтому дальнейшее изложение вопросов контроля и испытаний печатных плат будет ориентировано на эти методы. Особое внимание будет уделено методу металлизации сквозных отверстий, поскольку он сочетает в себе и химический метод в изготовлении внутренних слоев, и позитивный метод при металлизации отверстий и изготовлении наружных слоев.

ГЛАВА 2

ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Конструирование печатных плат — отдельная тема, не раскрываемая полностью в этой книге. Процесс конструирования нормирован всевозможными стандартами настолько, что писать о нем — повторять эти многочисленные стандарты. Поскольку технолог при общении с разработчиком должен представлять интересы производства, ему нужно иметь свою точку зрения на выбор конструктивно-технологических решений при проектировании печатных плат. Конечно, он должен считаться с тем, что выбор решений по конструкциям и методам изготовления печатных плат продиктован функциями, выполняемыми электронной аппаратурой и используемыми в ней компонентами, и такими рабочими характеристиками разрабатываемой системы, как производительность, энергопотребление, методы теплоотвода, характеристики окружающей среды, в которой система будет работать.

С другой стороны, разработчик должен учитывать производственные требования к технологичности конструкции: выбору доступных и опробованных материалов конструкций, серийнопригодности, контролепригодности, себестоимости и т.д., что определяет время и издержки освоения новых изделий в производстве, их производственную надежность и себестоимость. Технолог должен быть вооружен такими аргументами и терминами, которые позволят ему разговаривать на одном языке с конструкторами и с пониманием воспринимать его контраргументы и обоснования выбранных решений.

Этот раздел о выборе конструктивно-технологических решений рассчитан на технологов для общения с конструктором.¹

2.1. Корпуса микросхем

Наиболее важными факторами, влияющими на разработку конструкций печатных плат и их топологий являются, конфигурации выводов активных компонентов и шаг между ними, особенно для тех микросхем и их корпусов, конструкция которых определяется необходимой плотностью компоновки и, соответственно, плотностью монтажа. Эти факторы определяют облик конструкции печатной платы и печатного узла.

Развитие микроэлектронных компонентов постоянно идет в направлении увеличения интеграции, производительности и функциональности. Данный процесс характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75% в год, а это, в свою очередь, вызывает необходимость в увеличении количества их выводов на корпусе на 40% в год. Вышеизложенные факты обуславливают постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, позволяющие увеличить плотность межсоединений на печатной плате.

В результате общих тенденций, площадь монтажных подложек уменьшается примерно на 7%, а физические размеры электронной аппаратуры на 10-20% в год. Эта тенденция поддерживается непрерывным увеличением плотности межсоединений за счет уменьшения элементов печатного монтажа (ширины проводников и зазоров, отверстий и контактных площадок), пространственного (послойного) распределения межслойных переходов за счет использования сквозных, глухих, слепых отверстий. Все это серьезно влияет на облик производства печатных плат, — увеличивается стоимость основных фондов, объем прямых издержек, цикл производства. В конечном итоге, все это приводит к увеличению себестоимости плат.

2.1.1. Конструкции корпусов микросхем

С самого начала кристаллы микросхем помещали внутрь керамических или пластмассовых корпусов. Примерно до 1980 г. все

Наиболее полно собран справочный материал по проектированию печатных плат в учебнике Е.В. Пирогова «Проектирование и технология печатных плат».

корпуса микросхем имели выводы, предназначенные для монтажа в металлизированные отверстия (PTH — Plated Through-hole) печатной платы и последующей пайки. Позднее, с увеличением интеграции, их выводы стали делать в форме, пригодной для технологии поверхностного монтажа (SMT — Surface Mounting Technology), ставшей преобладающей технологией монтажа электронных компонентов.

На промежуточном этапе развития технологий монтажа, получили распространение корпуса микросхем, пригодные как для монтажа в отверстие, так и для поверхностного монтажа.

Основными типами корпусов микросхем, в зависимости от расположения их выводов, являются:

- корпуса с периферийным расположением выводов, когда выводы расположены по краям кристалла или корпуса микросхемы;
- корпуса с матричным расположением выводов.

Большинство типов микросхем имеют периферийное расположение выводов. Практически, шаг периферийных выводов ограничен 0,3 мм, что позволяет микросхемам с корпусами больших размеров иметь до 500 выводов. Но нужно принять во внимание, что при шаге выводов меньше 0,5 мм выход годных изделий резко снижается.

Компоненты с матричным расположением выводов имеют большое разнообразие:

- CSP (Chip-scale Packages — корпус, соизмеримый с размером кристалла),
- PBGA (Plastic Ball Grid Array — пластмассовые корпуса с шариковыми матричными выводами),
- CBGA (Ceramic Ball Grid Array — керамические корпуса с шариковыми матричными выводами),
- PPGA (Plastic Pin Grid Array — пластмассовые корпуса с матричными контактными площадками),
- CCGA (Ceramic Column Grid Array — керамические корпуса со столбиковыми матричными выводами).

Предполагается, что микросхемы с количеством выводов от 150 до 200 будут выполняться в корпусах с периферийным расположением выводов. Для микросхем с количеством выводов более 150-200 предпочтительнее матричная система выводов, так как она делает возможным размещение большого количества выводов на ограниченной площади.

Конструкции выводов в матричной системе:

- столбиковые выводы из припоя, армированного «путанкой» из тонкого провода, для корпусов микросхем и многокристальных модулей MCM (MCM — Multichip Module), часто называемых также как матрица контактных площадок (pad grid), матрица выводов (land grid)
- матрица шариковых выводов (BGA — ball grid array) с шагом выводов 1,50 мм (0,060 дюйма), 1,27 мм (0,050 дюйма), 1 мм (0,040 дюйма), 0,8 мм (0,03 дюйма) и менее.

Матричная система выводов обеспечивает ряд очевидных преимуществ. Наиболее важными являются:

- минимальная площадь монтажного поля подложки;
- лучшие условия обеспечения функциональной производительности электронных модулей за счет меньших паразитных эффектов на быстродействующих операциях;
- упрощение технологии поверхностного монтажа на печатную плату;
- больший выход готовой продукции вопреки опасениям потери качества, из-за невозможности прямого визуального контроля соединений.

С уменьшением шага выводов особенно важно, чтобы разработчики печатных плат считались с необходимостью обеспечения технологичности их конструкций, правильно с этих позиций оценивали не только сборочные, но и производственные характеристики печатных плат, чтобы разработанные конструкции гарантировали наибольший выход и наименьшую себестоимость готовой продукции.

2.1.2. Непосредственный монтаж кристаллов на подложку

Потребности в уменьшении массы и габаритов конструкций электронной аппаратуры обусловили интерес к методам непосредственного монтажа кристаллов микросхем на плату (DCA — Direct Chip Attach): «кристалл на плате» — COB (Chip-on-Board) или многокристальные модули (MCM — Multi-Chip-Module).

Кристаллы микросхем монтируют на подложку одним из четырех методов:

1. Термокомпрессионная микросварка (wire-bonding) — наиболее старый, наиболее гибкий и широко применяемый метод (рис. 2.1). Этим методом до сих пор изготавливают более 96 % всех микросхем.

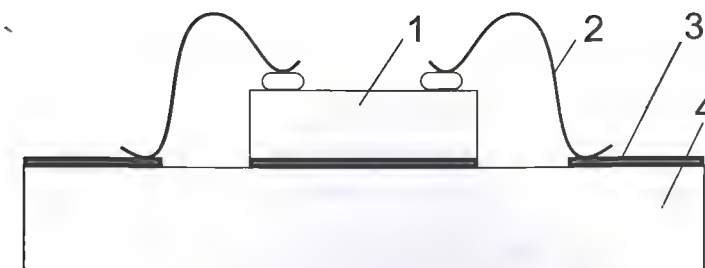


Рис.2.1. Разводка кристалла методом компрессионной микросварки. 1 — кристалл микросхемы, 2 — микропроволока, 3 — контактная площадка монтажной подложки, 4 — подложка.

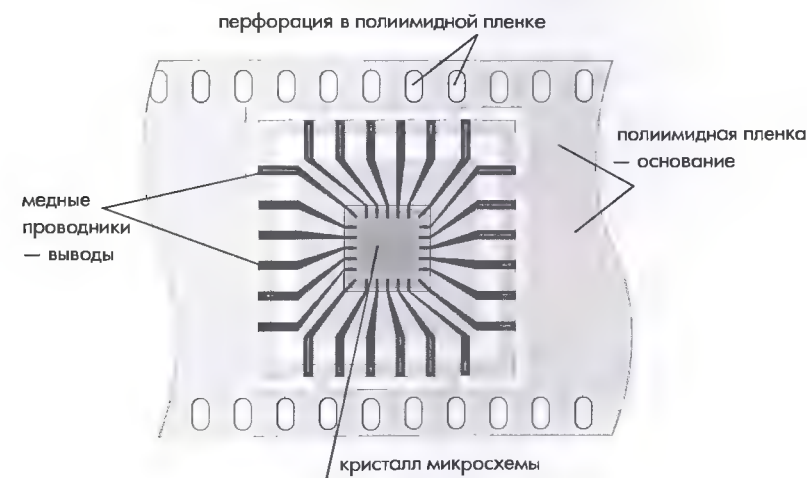


Рис. 2.2. Ленточный носитель кристалла микросхемы.

Присоединение кристаллов к выводам ленточного носителя (рис. 2.2) или ТАВ (Tape-automated Bonding). Этот метод используется для автоматического монтажа кристаллов с малым шагом выводов на промежуточный носитель. Кроме возможности автоматизации монтажа, он обеспечивает возможность предварительного тестирования кристаллов перед окончательной установкой его на монтажную подложку.

3. Присоединение перевернутого кристалла (Flip-chipping) через шариковые выводы (рис. 2.3). Компактность и улучшенные электрические характеристики этого метода межсоединений способствуют его расширяющемуся применению.

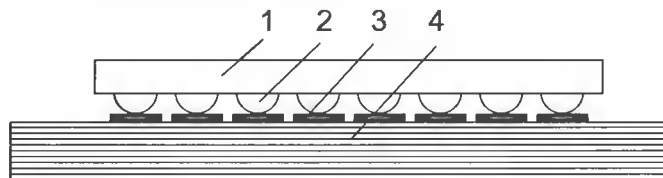


Рис. 2.3. Монтаж микросхемы на подложку методом перевернутого кристалла. 1 — кристалл микросхемы, 2 — шариковый вывод, 3 — контактная площадка монтажной подложки, 4 — монтажная подложка.

4. Присоединение кристалла балочными выводами (рис. 2.4). В этом методе используют технологии термокомпрессионной и ультразвуковой микросварки балочных выводов к периферийным контактным площадкам на кристалле и, затем, — балочных выводов к монтажной подложке.

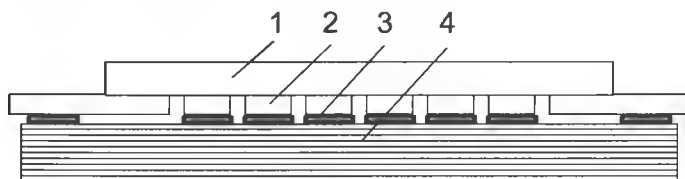


Рис. 2.4. Монтаж микросхемы с помощью балочных выводов. 1 — кристалл микросхемы, 2 — балочный вывод, 3 — контактная площадка монтажной подложки, 4 — монтажная подложка.

При оценке возможности использования этих методов, необходимо принимать во внимание разные температурные коэффициенты расширения кристаллов из кремния и монтажной подложки. Кроме прямого решения этой проблемы выбором соответствующего материала подложки, она может быть эффективно решена заливкой эпоксидной смолой, разделяющей кристалл и плату. Подобный прием позволяет выровнять деформации кристалла и подложки и, за счет этого, существенно улучшить надежность таких сборок.

2.1.3. Микрокорпуса (CSP)

При непосредственной установке кристаллов на монтажные подложки не всегда представляется возможность предварительно убедиться в их правильной работе до их монтажа на подложку. К настоящему времени существует несколько технологий для решения этой проблемы. В зарубежной терминологии эта проблема имеет название — «заведомо исправный кристалл» (KGD — Known Good Die). Один из путей ее решения — использование микрокорпусов, размеры которых лишь ненамного превышают размеры кристалла, но выполняют функции защиты от внешней среды и перераспределяют выводы кристалла на матрицу выводов микрокорпуса. Применение микрокорпусов позволяет тестировать микросхему до установки ее на монтажную подложку. На микросхемах с программируемой логикой (ПЛИС) создается возможность программировать их пережиганием перемычек в соответствии с задуманной схемой. Типовой пример микрокорпусов — CSP-корпус (CSP — Chip-scale Packaging).

Поскольку для некоторых CSP-корпусов шаг матричных выводов составляет 0,5 мм (0,020 дюйма) и менее, требуется использование специальных технологий производства печатных плат, позволяющих обеспечить разводку сигнальных цепей в узких пространствах между элементами монтажного поля.

Существующие технологии производства печатных плат способны обеспечить монтаж выводов бескорпусных микросхем, если он выполняется по технологии термокомпрессионной сварки или с использованием ленточных носителей (ТАВ-технологии). И, хотя такое решение переносит трудности защиты открытых кристаллов микросхем на корпусирование электронных модулей, оно все еще остается одним из наиболее эффективных методов монтажа бескорпусных микросхем.

При использовании корпусов с малым шагом матричных выводов ситуация усложняется тем, что сигнальные связи от внутренних выводов матрицы необходимо вывести между контактными площадками матрицы. При этом имеется возможность провести между контактными площадками один, максимум, два проводника. Поэтому, в большинстве случаев, проводники от внутренних выводов матрицы выводятся по внутренним слоям многослойных печатных плат.

Многослойные печатные платы, изготовленные традиционным методами металлизации сквозных отверстий, плохо приспособлены

к монтажу микросхем с матричными выводами с шагом менее 8,0 мм (0,03 дюйма). И, в то же время, уже созданы корпуса микросхем типа CSP с шагом матричных выводов 0,508 мм (0,020 дюйма) и 0,254 мм (0,010 дюйма). Для монтажа таких компонентов к МПП добавляются специальные слои с глухими металлизированными отверстиями, на которых реализуется разводка цепей из-под микрокорпусов или из-под бескорпусных кристаллов микросхем.

Такие тонкие дополнительные специализированные слои, напрессовываются на МПП, после чего в них выполняются глухие металлизированные отверстия. Поэтому этот метод за рубежом получил названием (буквально) «напрессованная на поверхность схема» (SLC — Surface Laminar Circuit). И, хотя в России для этого метода пока нет установившегося термина, можно видеть, что в нем соединены метод металлизации сквозных отверстий и метод послойного наращивания. Значит, ему можно присвоить длинное название — «МПП с послойным наращиванием внешних слоев» или «МПП с глухими отверстиями», пока в русской среде специалистов не установится более лаконичное название.

2.1.4. Количество выводов и степень интеграции микросхем

При монтаже кристаллов на подложку корпуса и корпуса на монтажную подложку (плату) или при непосредственном монтаже кристалла на плату неизбежно увеличиваются используемые для этого площади. Это вызвано необходимостью выделения определенного физического пространства для размещения выводов. А число выводов подчиняется общей тенденцией их увеличения с увеличением интеграции микросхем:

$$n = qN^R,$$

где n — количество выводов, q — коэффициент связности микроэлементов в структуре микросхемы, N — степень интеграции микросхемы, R — показатель Рента.

В противоположность степени интеграции, этот эффект называют степенью дезинтеграции, которая оценивается отношением плотности микроэлементов, отнесенной к монтажной площади на плате с их плотностью размещения на кристалле. Например, если кристалл процессора имеет размер 10×10 мм, а монтажное поле его

корпуса на плате занимает площадь 4000 мм, такое конструктивное исполнение системы межсоединений характеризуется дезинтеграцией с числом 10. Эта цифрой оценивается матрица из 800 выводов. Периферийное расположение такого количества выводов с шагом 0,4 мм занимает монтажное поле площадью 8000 мм, значит степень дезинтеграции такого конструктивного исполнения — 100.

Нужно заметить, что степень дезинтеграции растет по мере возрастания иерархического уровня конструкции: кристалл — микросхема — печатный узел — модуль — блок — ... Например, дезинтеграция в блоке может достигать цифры 100 тыс.

В табл. 2.1 приведены данные грубой оценки дезинтеграции при использовании различных методов корпусирования и установки кристаллов микросхем процессора на монтажное основание (плату).

Таблица 2.1. Оценка дезинтеграции при переходе на следующий уровень межсоединений

Вариант монтажа или установки	Площадь монтажного поля на подложке, мм	Степень дезинтеграции
Кристалл	10×10	1
Flip-Chip	12,5×12,5	1,5
Wire-Bond	14×14	2
Flip-TAB	24×24	6
TAB	42×42	18
Flat-Pack	72×72	52
Корпус с периферийными выводами	105×105	110

Очевидно, что степени интеграции и дезинтеграции должны соответствовать техническому уровню развития производства. При стремлении выполнить конструкцию на предельных возможностях производства, стоимость изделия станет неоправданно высокой из-за большого объема отходов на брак. Надежность таких конструкций также не будет гарантирована. Если же в производство поступит изделие, спроектированное по низким проектным нормам, т.е. с большой степенью дезинтеграции (больших габаритов), его большая материалоемкость, низкая фондоотдача («из пушки по воробьям») также пагубно скажется на его себестоимости.

2.2. Координатная сетка

Положение печатного рисунка на плате регламентируется условной координатной сеткой — ортогональной сеткой, состоящей из параллельных осей X-Y линий, условно или фактически нанесенных на чертеж печатной платы. Расстояние между двумя ближайшими параллельными линиями называют шагом координатной сетки. Точки пересечения линий координатной сетки называют узлами. Узлы координатной сетки предназначены для определения местоположения монтажных и переходных отверстий, контактных площадок для монтажа поверхностно-монтируемых компонентов. Поэтому шаг координатной сетки печатной платы должен строго соответствовать шагу выводов радиоэлементов (рис. 2.5).

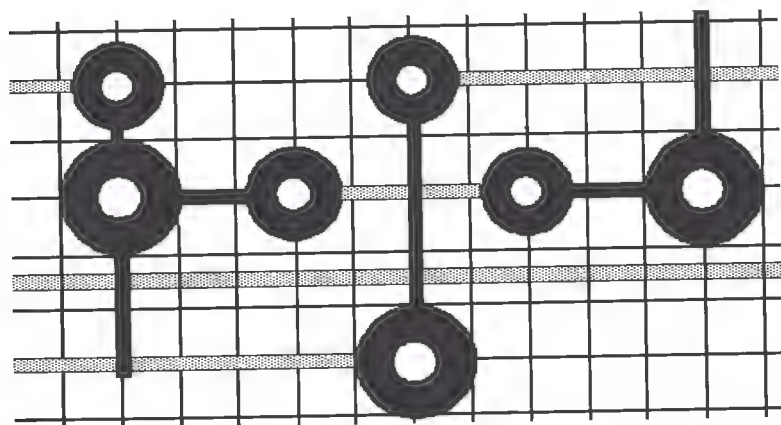


Рис. 2.5. Координатная сетка

В отечественной практике используют шаг основной координатной сетки 2,5 мм. По мере уплотнения печатного монтажа используют вспомогательные координатные сетки, шаг которых получают делением или умножением шага основной координатной сетки на 2^n . Таким образом, получают ряд мелких шагов вспомогательных сеток: 0,625; 0,3125 мм и дополнительных шагов, получаемых путем сложения разных шагов, например: $2,5 + 0,625 = 3,125$ или $0,625 + 0,3125 = 0,9375$ мм.

Иногда возникает необходимость назначения координатной сетки печатных проводников с шагами, отличающимися от шага основной или вспомогательной координатной сетки. Например, в отдельных случаях для уравнивания изоляционных зазоров удобно принять шаг проводников, равный 0,5 мм.

Сейчас, при преимущественном использовании импортных компонентов с дюймовой метрической системой, повсеместно перешли на, так называемую, дюймовую сетку с шагом основной координатной сетки 2,54 мм. Однако и современные импортные компоненты с матричной системой выводов начинают приобретать шаги в метрической системе измерений. Поэтому нужно быть готовым к смешению систем измерений и простановки размеров. В этом случае, при переходе от дюймовой системы к метрической нужно проставлять размеры с округлением до знака, соответствующего допуску на проставляемый размер. Неправоммерно, например, переводить дюймовый размер $1/8''$ в метрический, как 3,175 мм, если допуск на этот размер проставляется $\pm 0,1$ мм. Значение этого метрического размера нужно округлить до 3,2 мм.

2.3. Элементы проводящего рисунка

2.3.1. Печатные проводники

Размеры печатных проводников по длине и ширине выбираются с позиций обеспечения электрических требований по плотности тока, омическому сопротивлению, реализации специальных электрических параметров и механической устойчивости. С другой стороны, эти требования должны соответствовать разрешающей способности печатного рисунка. Последнее обстоятельство определяется принятым методом изготовления печатной платы и адгезионными свойствами базового материала.

Современные фоторезисты имеют достаточно высокую разрешающую способность, соизмеримую с толщиной фоторезиста. Лучшую разрешающую способность имеют жидкие позитивные фоторезисты: 25 линий на миллиметр. Сухие пленочные фоторезисты — 10...20 линий на миллиметр (в зависимости от толщины пленки). Поэтому ограничения по минимальной ширине проводников возникают не на этапе получения фоторезистивного рисунка, а на технологических операциях изготовления металлического рисунка печатной схемы.

Негативному способу получения рисунка печатной схемы свойственно незначительное уменьшение ширины проводника в результате бокового подтравливания меди. Величина подтравливания обычно соизмерима с толщиной фольги и зависит от характера травящего раствора, способа и времени травления. При использовании тентинг-метода глубина травления складывается из толщин фольги и гальванического осаждения, поэтому воспроизводимость рисунка оказывается не лучше, чем 0,15/0,15 мм (проводник/зазор).

При позитивном методе изготовления печатных плат разрешающая способность несколько ухудшается за счет наличия гальванической пары: медь — металлорезист. Но глубина травления здесь меньше чем при тентинг-методе, но несколько больше, чем при химическом методе на толщину гальванической затяжки.

2.3.2. Металлизированные отверстия

Металлизированные отверстия выполняют роль монтажного элемента или межслойного соединения (рис. 2.6). Диаметры сквозных монтажных отверстий для выполнения нормальных условий пайки должны быть на 0,2...0,4 мм больше диаметра вывода радиоэлемента. Вместе с этим гальваническое покрытие получается удовлетворительным при определенном соотношении между диаметром отверстия и толщиной платы. Это соотношение связано с рассеивающей способностью электролитов и, отчасти, с режимами гальванического осаждения.

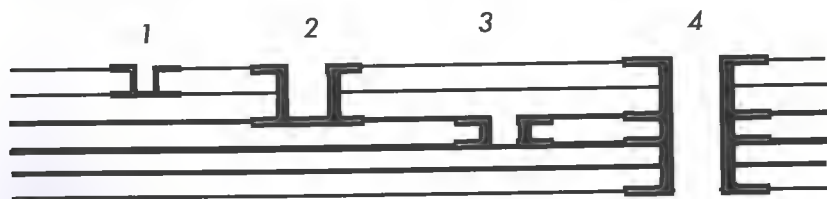


Рис. 2.6. Типы переходных отверстий, выполняющих роль межслойных соединений: 1 — глухое отверстие в одном уровне; 2 — глухое отверстие — соединение в двух уровнях; 3 — внутренний межслойный переход — слепое отверстие; 4 — сквозное отверстие.

Переходные сквозные отверстия должны быть отделены от монтажных контактных площадок, чтобы предотвратить вытекание припоя с монтажных поверхностей (рис. 2.7).

Неглубокие глухие отверстия и тем более металлонаполненные глухие отверстия могут выполняться в монтажных контактных площадках.

В процессе эксплуатации ПП, в составе аппаратуры металлизация отверстий постоянно испытывает переменные во времени термомеханические напряжения, вызванные разностью в термическом расширении меди и диэлектрического основания. Устойчивость к термомеханическим нагрузкам обеспечивается соответствующей толщиной и пластичностью металлизации отверстий. ГОСТ 23752 устанавливает среднее значение толщины медной металлизации в отверстиях 25 мкм при возможном минимальном значении 20 мкм. Это значение толщины металлизации установилось в процессе многолетней практики изготовления и эксплуатации ПП с отношением толщины ПП к диаметру отверстия 1...3. Действительно, анализ отказов металлизированных переходных отверстий, не заполненных припоем, показывает, что при толщине металлизации около 7 мкм отказ соединения неизбежно возникает, при толщине 15 мкм вероятность отказа примерно 0,9. И только толщина 20 мкм обеспечивает надежность соединений в течение длительного периода эксплуатации аппаратуры. Поэтому основное условие гарантий надежности соединений по металлизированному отверстию состоит в том, что толщина медного гальванопокрытия без дефектов не должна быть менее 20...25 мкм. Чтобы не допустить дефектов металлизации в виде незначительных не металлизированных участков, создающих очаги повышенной концентрации напряжений, толщину металлизации увеличивают до 30...35 мкм.



Рис. 2.7. Разделение контактных площадок монтажной от сквозного отверстия.

Металлизация монтажных отверстий участвует в теплопередаче в процессе пайки. Поэтому для удовлетворительного пропая, желательно, чтобы толщина металлизации была тем больше, чем глубже сквозное отверстие. Дефекты металлизации в виде кольцевых утончений или трещин неизбежно приводят к непропаю, так как создают заметные препятствия для теплопереноса.

Увеличение толщины печатной платы сверх отношения толщины к диаметру 4:1 приводит к значительным осложнениям в обеспечении надежности металлизированных отверстий, так как они менее устойчивы к воздействию термомеханических напряжений.

2.3.3. Монтажные контактные площадки. Финишные покрытия.

Разнообразие финишных покрытий настолько велико, что приходится говорить о том, что ни одно из них не удовлетворяет всему комплексу требований к пайке и длительному сохранению способности к пайке (смачиванию).

В технологии печатных плат финишные покрытия формируются одним из двух методов: из металлорезиста, используемого при травлении рисунка, и специальным осаждением покрытия под пайку на монтажные поверхности. Гальванические покрытия металлорезистами при травлении окисляются настолько, что приходится применять для них специальные процессы дезоксидации (осветления). Для легкоплавких металлорезистов можно использовать оплавление (гальванический сплав олово-свинец), и тем самым, значительно улучшать способность к пайке. Поскольку медь проводников образует с оловом интерметаллиды, из-за которых исчезает способность к пайке, под металлорезистом формируют барьерный подслоя, например, никеля. Тогда способность к пайке сохраняется достаточно длительный срок, даже без оплавления олово-свинца. Поскольку, кроме способности к пайке, приходится считаться и с устойчивостью металлорезистов к травящим растворам, в таблице 2.2 показаны основные системы травителей для различных резистов.

Таблица 2.2. Травящие растворы по различным типам резистов.

Резисты	Травящие растворы	Качество рисунка
Гальванический сплав олово-свинец	Аммиачный комплекс хлорной меди	Хорошее
Гальваническое золото	Любые	Отличное
Гальванический никель	Хлорная медь	Хорошее
Гальваническое серебро	Хлорное железо или медь	Удовлетворительное
Фоторезисты	Хлорная медь или железо	Отличное
Трафаретные краски	Хлорная медь	Плохое

В табл. 2.3 приведены оценки качества поверхности, которое обеспечивают финишные покрытия для пайки компонентов.

Таблица 2.3. Оценки финишных покрытий поверхностей монтажных элементов.

Характеристики	Вид поверхности									
	Гальванический олово-свинец с подслоем никеля	HAL-процесс	Иммерсионные Ni/Au	Гальванический никель	Гальваническое олово с подслоем никеля	Пассивация органическими ингибиторами	Иммерсионное олово	Иммерсионное олово с барьерным подслоем	Палладий	Серебро
Паяемость	Отл.*	Отл.	Хор	Неуд.	Отл.	Отл.	Отл.	Отл.	Отл.	Хор.
Сохраняемость паяемости	Хор.	Отл.	Хор.	Удовл.	Отл.	Хор.	Нет	Отл.	Хор.	Хор.
Повторная пайка	Отл.	Отл.	Хор	Удовл.	Отл.	Нет	Удовл.	Отл.	Отл.	Отл.
Копланарность	Отсутствует	Отсутствует	Отл.	Отл.	Хор.	Отл.	Отл.	Отл.	Отл.	Хор.
Надежность паяк	Отл.	Отл.	Хор.	Плохая	Хор.	Удовл.	Удовл.	Хор	Хор.	Хор.
Использование как металло-резиста	Можно	Невозможно	Невозможно	Возможно	Можно	Невозможно	Невозможно	Невозможно	Можно	Можно
Затраты относительно тентинг-процесса	120 %	100 %	110 %	115 %	120 %	90 %	130 %		110 %	115 %

* После оплавления

Выбор финишных покрытий имеет вариантность.

Вариант 1. Если предпочтение отдано схеме процесса, по которой для защиты при травлении рисунка используется металлорезист (КПМ), в выборку попадают сплав олово-свинец, олово, никель, палладий и серебро. Из них, по паяемости без оплавления, лучшими могут быть олово, палладий и серебро. По устойчивости к электрохимическим отказам выгодно отличаются палладий и олово. По стоимости — предпочтительней олово.

Травление меди по оловянно-металлорезисту осуществляется в аммиачном комплексе хлорной меди — универсальном травящем растворе, пригодном, в том числе, для травления меди по фоторезисту.

Таким образом, для первого варианта в качестве металлорезиста и покрытия под пайку целесообразно использовать олово (точнее олово со следами кобальта) и, соответственно, в качестве травителя — аммиачный комплекс хлорной меди.

Вариант 2. Если требуется изготавливать платы не выше 4 класса точности по тентинг-процессу, в качестве финишного покрытия, как правило, используют горячее облуживание по паяльной маске. Но горячее облуживание неизбежно оставляет на поверхности монтажных площадок наплывы с неопределенной высотой от 0 до 0,3 мм. При установке чипов и компонентов в корпусе, типа BGA, эта разновысотность не позволяет реализовать установку таких компонентов. Горячее облуживание плат становится неприемлемой.

Альтернативой облуживанию являются иммерсионные покрытия оловом и золотом. Поскольку эти покрытия принципиально тонкие (меньше 1 мкм), они требуют использования барьерных подслоев, что несколько удорожает процесс. Тем не менее, он остается и надежней, и дешевле процесса горячего облуживания.

В последнее время начинают использовать покрытия органическими ингибиторами, сохраняющими способность плат к пайке в течение длительного времени.

2.3.4. Контактные покрытия

Разъемные электрические соединения, образованные концевыми печатными контактами с розетками соединителей, в соответствии со своим назначением должны иметь высокую поверхностную

проводимость в условиях воздействия агрессивных компонентов промышленной атмосферы и среды обитания людей, отличающейся относительно высоким содержанием аммиака и его соединений, сернистых соединений, жировой аэрозоли и других, обладать устойчивостью к многократным сочленениям-расчленениям, паяемостью (если контактное покрытие служит одновременно общим покрытием печатных элементов). Основные проблемы в выборе контактных покрытий состоят в обеспечении надежности контактов, которые должны одинаково хорошо работать в условиях как малых (цепи межсхемных соединений), так и больших (цепи питания) токовых нагрузок.

Развитие электронной техники привело к снижению коммутируемых контактами нагрузок; а миниатюризация — к уменьшению контактных давлений, к переходу от притирающихся разъемных соединений к нажимным (в соединителях с нулевым усилием сочленения), коммутирующим нагрузки от «сухих» до долей ампера, при напряжениях от микровольт до нескольких вольт, при малых усилиях нажатия, приходящихся на один контакт. Характерными особенностями режима работы концевых печатных контактов являются длительное замкнутое состояние с кратковременными перерывами и единичные включения с длительными перерывами (хранение в ЗИПе).

Электрическое сопротивление контакта при очень малых нагрузках значительно больше, чем при больших, и более критично к изменению тока в контактной цепи. Кроме того, при малых нагрузках всегда имеется вероятность сбоя, т. е. самовоостаивающихся отказов, возникающих по случайным причинам.

Цепи с малыми токами, как правило, являются высокоомными и не критичны к величине электрического сопротивления контакта, однако устойчивые тенденции к увеличению этого сопротивления могут служить признаком наступающего отказа.

Нагрузки в цепи контактов определяют механизм контактирования. Пассивные («сухие») нагрузки характеризуются такими уровнями тока и напряжения, что не могут создать условия пробоя поверхностных пленок. Проводимость контакта, в таком случае, может осуществляться только через контактные пятна, созданные силой, прижимающей контакты друг к другу. Механизм проводимости контакта при этом металлический или туннельный.

Активные нагрузки характеризуются такими уровнями токов и напряжений, которые создают проводящие участки контакта. При этих нагрузках основным механизмом образования контакта является электрический пробой — фриттинг, благодаря которому пробиваются загрязняющие слои и расширяются уже имеющиеся проводящие.

Таблица 2.4. Свойства окисных пленок контактных покрытий

Вид покрытия	Свойства окисных пленок
Золото и его сплавы с высоким содержанием золота	Тонкая окисная пленка на поверхности золота не препятствует надежному контактированию при наименьших контактных нажатиях (0,01...0,3 Н), усилиях сочленения до 0,1 Н, напряжениях менее 0,5 В и микротоках
Палладий, платина, иридий, родий, рений и другие металлы платиновой группы, сплав палладий-никель	Образуют относительно тонкую окисную пленку, требуют небольших контактных давлений (0,1...1 Н), усилий сочленения (0,2...2 Н) для осуществления надежного контакта в цепях с низким напряжением и микротоками. Сульфидные пленки на поверхности палладия обладают высокой проводимостью и поэтому не вызывают отказов в контактах
Серебро и его сплавы с высоким содержанием серебра	Имеют склонность к образованию окисных, сульфатных и сульфидных пленок, требующих больших контактных усилий продавливания (0,15 Н) или напряжений в цепи контакта для пробоя пленок. Требуют периодической зачистки контактов и больших усилий сочленения
Никель, олово и их сплавы	Образуют толстую (у никеля — твердую) окисную пленку. Для осуществления контакта требуется значительное контактное нажатие

Границей между пассивными и активными нагрузками является напряжение фриттинга, минимальное значение которого равно долям вольта при напряженности поля более 10^7 В/м.

Основное влияние на надежность слаботочных контактов оказывает состояние их поверхности. Поэтому, при выборе покрытия контактов, следует принимать во внимание способность к образованию окисных, сульфидных и сульфатных пленок, обусловленных наличием в атмосфере городов и помещений с людьми относительно больших концентраций окислов серы, сероводорода, аммиачных соединений и влаги. Свойства материалов для контактных покрытий приведены в табл. 2.4.

Благодаря особым свойствам в качестве контактных материалов чаще всего используются золото, палладий, серебро, олово и всевозможные сплавы этих металлов (золото-кобальт, золото-платина, палладий-никель, олово-никель и т. п.).

Золочение контактов — самый надежный способ обеспечения надежности разъемного соединения. Износостойкость золотого покрытия прямо зависит от толщины слоя золота и твердости материалов, из которых состоят контакты ответной части соединителя. Наибольший срок службы сопряженных контактов разъема обычно достигается выбором двух материалов, имеющих различную твердость. Так как контакты разъема покрываются твердым золотом, концевые печатные контакты должны быть покрыты относительно мягким золотом. Другим аргументом в пользу мягкого золота является то, что оно более стойко к атмосферным воздействиям, видимо, потому, что оно не загрязнено никакими присадочными металлами. Опасения относительно повышенного мягкого контактного покрытия не оправданы, поскольку плата сочленяется внешними соединителями аппаратуры и извлекается из него всего лишь несколько раз за весь период эксплуатации. Для покрытия контактов разъема целесообразно использовать твердое золото улучшения износостойкости их поверхности.

Твердое золото представляет собой сплав с такими металлами, как кобальт (до 1 %), никель, индий (примерно 3 %). Твердость по Виккерсу для твердого золота лежит в пределах $1400...2400$ Н/мм², в то время, как твердость мягкого золота составляет $600...800$ Н/мм².

Палладиевые покрытия имеют меньшую пористость и большую износостойкость, по сравнению с золотыми, что позволяет снизить толщину покрытия. Недостатками их являются способность катализировать деструкцию органических соединений и малая стойкость в средах, загрязненных газообразными выделениями полимерных материалов. Продукты полимеризации представляют собой тонкие, прозрачные пленки на контактной поверхности.

Серебряные покрытия со временем тускнеют, а затем чернеют из-за образования пленок — продуктов окисления и сульфидизации. При длительном хранении контактные поверхности из серебра пассивируются. Эти пленки при контактировании могут быть разрушены только в цепях с большими напряжениями и токами. Поэтому для переключения малых токов использование серебра нецелесообразно.

Олово относится к дешевым материалам, но из-за низкой износостойкости применяется в аппаратуре, где число сочленений-расчленений не превышает 50. Следует учитывать способность олова к образованию нитевидных кристаллов, способных вызвать короткое замыкание.

В высоконадежной микроэлектронной аппаратуре в качестве контактных покрытий начинают применять гальванический сплав палладий-никель, имеющий заметные преимущества перед покрытиями чистыми золотом и палладием. В табл. 2.5 и 2.6 приведены характеристики покрытий из указанных материалов.

Таблица 2.5. Контактное сопротивление

Вид покрытия	Электрическое сопротивление контакта (нажатие 0,7 Н), мОм.	
	Свежеосажденное покрытие	После 50 ч пребывания на воздухе при температуре + 125° С
Палладий	1,6 ± 0,5	2,3 ± 0,5
Палладий-никель	1,6 ± 0,5	2,2 ± 0,4
Палладий-никель+ +золото	1,4 ± 0,5	1,8 ± 0,5

Таблица 2.6. Пористость контактных покрытий.

Вид покрытия	Пористость покрытия толщиной 1 мкм на 1 см ²
Чистый палладий (с микро-трещинами)	90±30
Твердое золото	23±17
Чистый палладий (без микротрещин)	10±6
Палладий-никель	2±2
Палладий-никель+ +золото(0,8 мкм)	0,6

Надежность концевых печатных контактов ограничивается коррозией основы, через поры контактных покрытий, и диффузией основного металла, через тонкий слой контактного покрытия. Если подслоем контактного покрытия из золота или палладия служат медь

или серебро, коррозия начинается в порах покрытия при воздействии сульфатов, сульфидов и оксидов; ее продукты расползаются по поверхности контактного покрытия и вызывают повышение контактного электрического сопротивления, т. е. ухудшение контакта вплоть до полного разрыва электрической цепи. Поэтому между медью и контактным покрытием наносят барьерный слой никеля, устойчивого к воздействию сероводорода. Нанесение подслоя никеля способствует выглаживанию поверхности, что тоже способствует снижению пористости контактного покрытия. Замечено, что при прочих равных условиях пористость твердого золочения приблизительно в два раза больше, чем мягкого.

Практикой установлены следующие сочетания контактных покрытий:

- твердое золочение: 1...3 мкм по подслою никеля (4...6 мкм) или 2...4 мкм по меди;
- мягкое золочение: 0.5...2 мкм по подслою никеля (3...4 мкм) или 1,5 ...4 мкм по меди;
- палламирование: 2...3 мкм по подслою никеля (4...6 мкм).

2.3.5. Топология токопроводящего рисунка

Характер проводящего рисунка во многом определяет технологичность конструкции, надежность производства печатных плат. Анализ практики производства позволяет сформулировать ряд правил для конструирования печатного рисунка.

При трассировке проводников следует избегать острых углов. Во внутреннем пространстве такого угла образуется своеобразный карман, в котором часто наблюдаются недотравленные места, где при пайке скапливаются наплывы и сосульки припоя. При незначительных напряжениях сжатия в гальванических осадках, в результате термических воздействий пайки, острый угол может отслоиться от основания. Если проводник находится под высоким потенциалом, острие угла приобретает высокий градиент электрического поля, здесь сосредотачиваются загрязнения, в результате электростатического осаждения пыли. Создается опасность электрического пробоя.

Целесообразно размеры контактных площадок со стороны монтажа выполнять меньшими или, по крайней мере, такими же, как и со стороны пайки, чтобы в общем балансе теплопереноса уменьшить теплоотвод со стороны монтажа. Для качественного формирования

припоя, когда не используется паяльная маска, печатные проводники со стороны пайки следует располагать параллельно длинной стороне платы; в этом направлении наиболее вероятно движение платы при пайке волной припоя. Экраны и цепи питания, выполненные в виде массивов фольги, должны иметь вырезы и освобождения вокруг монтажных отверстий, чтобы предотвратить непропаи, отслоения фольги из-за напора газовыделений из материала основания и обеспечить возможность демонтажа выводов элементов.

Чтобы обеспечить равномерность распределения гальванопокрытия, предотвратить зарастание и подгар одиночных элементов печатного рисунка, следует сбалансировать площади, занимаемые рисунками на обеих сторонах платы и выровнять его распределение по поверхности рабочего поля платы. Это осуществляется путем введения избыточных (не функционирующих) металлических поверхностей так, чтобы добиться равномерной плотности рисунка по

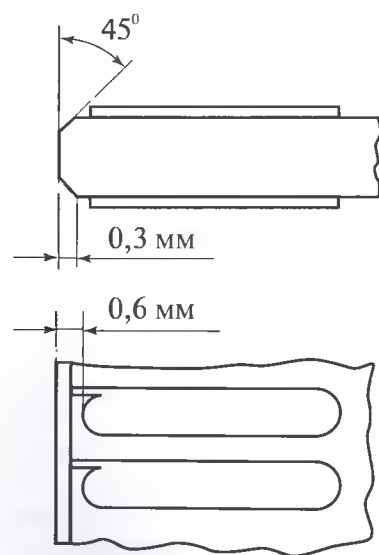


Рис. 2.8. Токопровод к печатным ламелям для осаждения контактных покрытий (удаляется при обработке плат по контуру).

всей плате. Заполнение свободных площадей может производиться либо непрерывными линиями сетки, либо отдельными изолированными элементами печати. При выборе того или другого типа рисунка для балансировки следует иметь в виду, что при нагревах ПП (термообработка, оплавление металлорезиста, сушка, пайка и т. д.) сбалансированность рисунка двух сторон существенно сказывается на короблении платы из-за разницы в механических напряжениях. Широко используемый принцип ортогональности топологии рисунка двух сторон приводит к скручиванию ПП. Несимметричность рисунка слоев в МПП относительно условного центра симметрии структуры слоев неизбежно приводит к заметному короблению.

Ширина ламелей концевых печатных контактов должна выбираться с учетом компенсации небольших боковых перемещений платы, имеющих место, вследствие люфтов в направляющих и некоторого бокового смещения контактов в ответной части разъема. Так как контактное покрытие на ламели наносится на завершающей стадии, т. е. после вытравливания рисунка, печатный рисунок должен иметь технологические проводники, соединяющие каждую ламель с шиной металлизации. Край платы, входящий в разъем, имеет фаску, выполняемую после нанесения контактных покрытий, поэтому, чтобы предотвратить его повреждение, край ламели должен немного отступать от края фаски, как показано на рис. 2.8. Край ламели скруглен, чтобы предотвратить отслоение фольги при сочленении ламелей концевых концевых печатного контакта с ответной частью.

2.3.6. Избирательная лаковая защита (паяльная маска)

Ряд элементов, монтируемых на ПП, не допускает возможности общей лакировки в составе печатного узла или блока. Например, лаковая защита плат с соединителями, регулировочными элементами (переменными резисторами, подстроечными конденсаторами, катушками и т. п.) требует трудоемких и малонадежных приемов использования антиадгезионных паст и лаков, предусматривающих отделение лака от поверхности и деталей, не подлежащих лакировке. Крепление некоторых элементов связано с необходимостью их установки непосредственно на ПП, что требует создания изолирующей прослойки между металлическими элементами на ПП и корпусом элемента (например, металлического корпуса ИС с пленарными выводами).

При групповой пайке печатных узлов и блоков между печатными проводниками образуются перемычки припоя. Их визуальное выявление и устранение ручным инструментом вносят дополнительную трудоемкость, до 15 мин, к тому же, случаи необнаружения тонких малозаметных закорачивающих перемычек могут приводить к выходу из строя элементов.

Эффективным средством повышения надежности печатных узлов и блоков, снижения трудоемкости производства является селективная лаковая защита, наносимая на ПП до монтажа элементов, методом трафаретной печати или фотохимии. Она представляет собой пленку нагревостойкой эмали или термостойкого сухого пленочного

фоторезиста, которая наносится на ПП так, что открытыми остаются только монтажные элементы и незначительная зона вокруг них, обусловленная погрешностями технологического процесса трафаретной печати или фотохимии.

Трудности точного нанесения избирательной лаковой защиты связаны с наличием рельефа печатных проводников на диэлектрическом основании, растеканием краев рисунка, образованного жидкой эмалью (до ее отверждения), растяжением сетчатого трафарета при продавливании через него краски движущимся ракелем. Гарантировать точность совмещения сетчатого трафарета с платой лучше, чем 0,15 мм — нереально, поэтому современная практика производства должна быть ориентирована на жидкие композиции, поддающиеся фотолитографической обработке, или на термостойкие сухие пленочные фоторезисты, формируемые на плате также методами фотолитографии.

Наслаивание сухого пленочного фоторезиста на рельеф печатного рисунка требует использования специального вакуумного ламинатора, чтобы гарантировать отсутствие газовых полостей по кромкам проводников. Остальные процессы (экспонирование, проявление) не имеют принципиальных отличий от обычных процессов, связанных с использованием фоторезистов.

Жидкой композиции присущи высокие точности позиционирования и воспроизведения прецизионного рисунка, обеспечивающие заполнение зазоров между монтажными контактными площадками с малыми шагами. Следует, однако, учитывать, что процессы трафаретной печати дешевле и производительнее. Если используются эмали с ультрафиолетовым отверждением, когда время отверждения не превышает 30 с, время, затрачиваемое на нанесение избирательной лаковой защиты, не превышает 1 мин.

2.3.7. Деформация печатных плат

Вообще говоря, деформация — естественное явление, свойственное композиционным материалам. Поэтому возможность и ограничение деформации (изгиба и скручивания) предусматривается ГОСТ 23752. Тем не менее, отклонение формы ПП от плоской не удовлетворяют современным требованиям процессов сборки и монтажа печатных узлов и блоков. Если не будут приняты меры по принудительному выправлению ПП в плоскость, их искривленное состояние будет

механически зафиксировано впаянными в них элементами. Особенно жестко фиксируют ПП длинные многовыводные контактные элементы: колодки, разъемы, трансформаторы и т. п. При установке ПП в блоки они вынужденно выпрямляются в плоскость за счет механического крепления или движения в направляющие блока. При этом могут возникать значительные напряжения, завершающиеся разрывом соединений. Характерно, что эти отказы не проявляются немедленно, их возникновение маскируется релаксационными явлениями в связующем диэлектрическом основании ПП.

Деформация ПП происходит по многим причинам. Главные из них — это асимметрия структуры слоев МПП, неравномерные усадочные явления в стеклопластиках, из-за разной ориентировки переплетений ткани, неравномерное распределение температуры и момента затвердевания смолы при прессовании, неравномерный нагрев ПП в процессе пайки.

Асимметрия МПП — результат неправильного проектирования: используются односторонние слои, положение печатного рисунка которых относительно основания одинаково по всей структуре МПП, не уравновешен баланс двусторонних слоев, с ортогональной трассировкой проводников, применены разнотолщинные материалы, слои с различной насыщенностью печатного рисунка и разное количество прокладочной стеклоткани, несимметрично распределенные в структуре слоев МПП. В большинстве случаев причиной скручивания ПП (винтообразная деформация) является несбалансированность слоев с ортогональной трассировкой проводников.

Такая же асимметрия в структуре слоев МПП может возникать в результате использования материалов из разных партий, отличающихся температурой стеклования, текучестью и содержанием связующего и т. д. Неравномерность усадки эпоксидной смолы, взятой из разных партий материалов, используемых в МПП, — наиболее вероятная причина коробления, когда все другие причины ликвидированы.

В ряде случаев, плату можно попытаться выпрямить, терморихтовкой, т. е. нагревом и охлаждением плат под металлической ретиной (температура нагрева 130° С, выдержка 2 ч). Но, если ее коробление вызвано несимметричностью конструкции, плата все равно вернется к деформированному состоянию.

Значительные деформации ПП могут возникать в процессе пайки, если не использовать приспособления, предотвращающие их искривление. Термомеханические напряжения, зарождающиеся в ПП из-за температурных градиентов, вызывают непредсказуемые коробления, которые не всегда обратимы. Особенно большие градиенты возникают при групповых методах пайки, если в процессе предварительного подогрева ПП не приобрела температуры, равной или немного более температуры стеклования связующего. Резкий перепад температур от стороны пайки в направлении монтажа сопровождается значительными напряжениями сдвига, которые могут вызвать не только коробление ПП, но и ее разрушение.

2.4. Плотность межсоединений

2.4.1. Методы увеличения плотности монтажа ПП

Существует четыре пути повышения плотности межсоединений и монтажа компонентов на печатных платах:

- уменьшение размера отверстий и контактных площадок, чтобы высвободить пространство для трассировки проводников;
- увеличение количества трасс между отверстиями за счет уменьшения ширины проводников и зазоров;
- введение многоуровневых межсоединений: отказ от сквозных отверстий в пользу глухих и слепых межслойных переходов;
- увеличение количества слоев.

Следует отметить, что большая часть аппаратуры выполнена с использованием двусторонних печатных плат. Если возникает необходимость в особо плотном монтаже, современные технологии и средства проектирования позволяют обойтись 6...10 слоями.

2.4.2. Влияние размеров и форм контактных площадок на плотность трассировки

Существенным сдерживающим фактором увеличения трассировочной способности является большой диаметр контактных площадок вокруг сквозных металлизированных отверстий. По существу, контактная площадка является той мишенью, в которую должно попасть отверстие при сверлении. Для выполнения предназначенных ей функций контактная площадка должна охватывать металлизированное

отверстие или, по крайней мере, должна исключать торцевую связь проводника с металлизированным отверстием на ограниченном участке, как показано на рис. 2.9. Надежность торцевой связи гораздо меньше, чем прочность связи контактной площадки с отверстием по окружности, большей 180°.

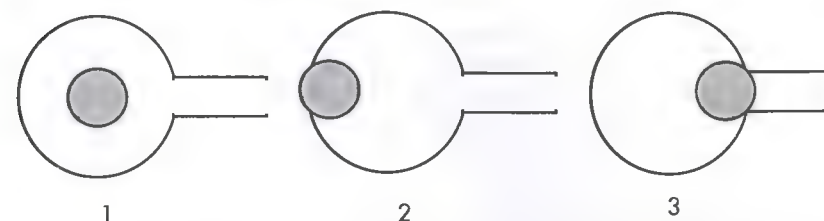


Рис. 2.9. Возможные варианты совмещения отверстия с контактной площадкой: 1 – хорошо; 2 – возможно; 3 – не допустимо.

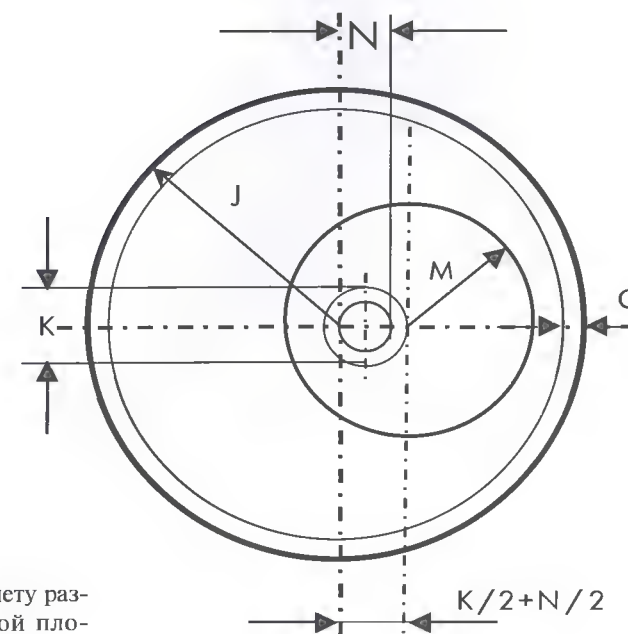


Рис. 2.10. К расчету размера контактной площадки.

Поэтому считается, что надежное соединение обеспечивается лишь при наличии гарантированного пояска охвата отверстия контактной площадкой. Его минимальные размеры обычно принимаются равными толщине фольги. Расчет минимального размера контактных площадок производят из условий обеспечения минимальной ширины гарантированного пояска охвата, с учетом всех неизбежных погрешностей производства. Рис. 2.10 показывает соотношение геометрических и позиционных погрешностей, принимаемые в расчете. Грубый расчет размера контактных площадок на твердых основаниях производят, ориентировочно, по формуле:

$$J_{\min} = M + K + N + \Delta B_- + 2G,$$

где $J_{\min}$ — минимальный размер контактной площадки наружного слоя; M — диаметр сверления; K — позиционная точность сверления; N — позиционная точность рисунка; ΔB_- — отрицательный допуск на размер контактной площадки (подтравливание рисунка); G — минимальная ширина пояска охвата металлизированного отверстия контактной площадкой наружного слоя (гарантированный пояс).

При расчете контактных площадок тонких (деформируемых) оснований — (внутренних слоев МПП, гибких печатных плат) учитывают дополнительные погрешности совмещения: погрешности базирования величин деформаций пленочных фотошаблонов и слоев после травления и прессования.

Некоторый выигрыш в уменьшении размера контактной площадки и соответствующем увеличении трассировочного пространства можно получить за счет удлинения ее формы в сторону подхода проводника к контактной площадке, как показано на рис. 2.11.

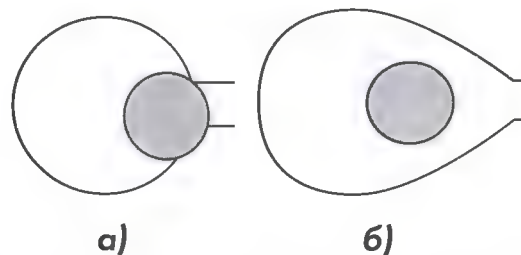


Рис. 2.11. Возможные формы контактных площадок. а) обычная форма, б) контактная площадка, удлиненная в сторону подхода проводника.

Вообще говоря, контактная площадка, это геометрическое место точек, куда может попасть сверление. Поэтому ее размер должен поглотить это геометрическое место с какой-то вероятностью. Подробно об этом в соответствующем разделе.

Размеры контактных площадок существенно сказываются на трассировочной способности печатных плат. Например, в одном проекте уменьшение диаметра площадок с 1,4 до 1,0 мм (на 40%) позволяет более, чем втрое, увеличить плотность межсоединений, в то время, как уменьшение ширины проводников и зазоров с 0,3 до 0,15 мм (на 50 %) позволяет увеличить ее лишь вдвое. Очевидно, что уменьшение диаметра контактных площадок или исключение их вообще может быть более действенным способом увеличения плотности межсоединений, чем уменьшение ширины проводников.

2.4.3. Уменьшение ширины проводников и зазоров

Очевидно, что уменьшение ширины проводников и зазоров позволяет увеличить количество трасс на каждом слое платы. К такому решению стремятся в производстве интегральных микросхем и печатных плат в течение многих лет. Но, все же, уменьшать ширину проводников бесконечно невозможно. Такое уменьшение ограничено токонесущими свойствами и омическим сопротивлением проводников. Омическое сопротивление, в еще большей мере, сказывается на работоспособности схем, когда они имеют большую длину, что для печатных плат не редкость. Существуют и технологические ограничения на ширину проводников, связанные непосредственно с производственным процессом выход готовой продукции резко падает, если требования к производственным процессам не укладываются в рамки нормальных допусков, определяемых применяемым оборудованием, материалами и параметрами климатической зоны производственных помещений.

Имеются также ограничения и на уменьшение расстояний между проводниками (изоляционные зазоры). Их размер определяется, исходя из требований к электрическим характеристикам, например, необходимостью снижения уровня перекрестных помех, минимизацией шумов, создания условий для безыскаженной передачи сигналов и формирования требуемого волнового сопротивления. Для силовой электроники следует считаться с ограничениями по электрической прочности изоляционных зазоров. Напряжение пробоя лакированных

плат определяется электрической прочностью лакового покрытия, зазоры между открытыми проводниками на диэлектрическом основании пробиваются по поверхности платы (табл. 2.7). Электрохимическая форма пробоя не зависит от ширины зазора и не поддается прямому расчету.

Таблица 2.7. Изоляционные зазоры в зависимости от рабочего напряжения

ДПП платы и наружные слои МПП без изоляционного покрытия		ДПП с изоляционным покрытием и внутренние слои МПП	
Постоянное напряжение или амплитуда переменного напряжения, В	Минимальный изоляционный зазор, мм	Постоянное напряжение или амплитуда переменного напряжения, В	Минимальный изоляционный зазор, мм
0 – 50	0,5	0 – 9	0,125
51 – 150	0,6	10 – 30	0,25
151 – 300	1,25	31 – 50	0,35
301 – 500	2,5	51 – 150	0,50
Более 500	0,005 мм на 1 В	151 – 500	1,50
		Более 500	0,003 мм на 1 В

Тем не менее, если удалось достичь уменьшения ширины проводников с учетом описанных ограничений, то это позволит эффективно повлиять на плотность и снижение себестоимости производства печатных плат, как показано на примере анализа одного из реальных производств в табл. 2.8. Видно, что уменьшение ширины дорожек со 150 мкм до 80 мкм позволяет вдвое уменьшить число сигнальных слоев и существенно снизить себестоимость производства печатных плат.

Показанное в табл. 2.5 снижение себестоимости осуществляется за счет снижения материалоемкости печатных плат. Было уже отмечено, что в составляющих себестоимости стоимость материалов стоит в первой строчке. Но эта мера снижения стоимости плат оправдана лишь в том случае, если созданы соответствующие производственные условия для уменьшения размеров проводников и зазоров. Для этого недостаточно иметь хорошее оборудование и материалы, нужны еще особые климатические условия в производственных помещениях, ответственных за этот процесс.

Тогда можно рассчитывать на приемлемый выход годной продукции. В противном случае уменьшение размеров проводников и зазоров или увеличит объем брака, или увеличит объем трудозатрат на исправление дефектов, уменьшит надежность печатных плат. То и другое увеличит себестоимость и, значит, не приведет к желаемому результату.

Таблица 2.8. Влияние ширины проводников и зазоров на количество слоев и себестоимость производства многослойных печатных плат размером 160×233,3 мм

Проводник/ зазор, мм	Общее количество слоев	Количество сигнальных слоев	Относительная себестоимость, %
175/200	20	10	100
150/150	16	8	90
125/175	14	8	87
125/150	12	7	77
100/100	10	6	64
80/80	8	4	55

2.4.4. Увеличение количества слоев

Сегодня многие производства, желая показать свои достижения, говорят о возможностях изготовления МПП с большим количеством слоев (30...40) и, соответственно, большей толщины (до 6 мм). Действительно, раньше, когда использовались несовершенные САПР, всегда принимались волюнтаристские решения, ведущее прямо к достижению цели: когда на существующих слоях печатной платы не достатало места для разводки всех необходимых внутрисхемных соединений, добавляли еще один слой. Теперь, когда вопрос себестоимости приобрел первостепенную важность, при разработке многослойных ПП процесс проектирования направлен на минимизацию числа слоев, потому что каждый новый слой существенно увеличивает себестоимость печатной платы. Табл. 2.5 также демонстрирует, что любое увеличение количества сигнальных слоев в платах, работающих в составе высокопроизводительной или высокочастотной аппаратуры, когда требуется выдерживать характеристики линий передач, будет вдвое больше, т. к. для

них необходимо экранирование слоями земли и питания, прокладываемые между сигнальными слоями.

2.4.5. Оценка плотности межсоединений

Растущие конструктивно-технологические требования к печатному монтажу особенно четко установились в области вычислительной техники, поскольку увеличение производительности ЭВМ наряду с увеличением быстродействия элементной базы находится в непосредственной зависимости от возможностей сокращения длины связей между логическими элементами, так называемой конструктивной задержки передаваемого сигнала. Достаточно сопоставить значение времени переключения логических элементов, не превышающее в современных ИС, СИС и БИС единиц наносекунд, с временем распространения сигнала в печатных линиях связи, составляющем 6...7 нс/м, чтобы показать, что главной составляющей временных задержек в электронных устройствах современного и перспективного типов являются задержки в межсоединениях. Отсюда следует, что повышение быстродействия логических элементов должно сопровождаться максимально возможным снижением задержек в межсоединениях, т. е. сокращением их длины. Это достигается повышением степени интеграции логических элементов и более плотной компоновкой микросхем на платах.

В свою очередь, увеличение степени интеграции (N) вызывает рост числа входных (выходных) контактов (выводов корпуса) микросхем n , подчиняющийся соотношению Рента:

$$n = kN^p,$$

где k — среднее число межсоединений, приходящееся на один логический элемент в ИС, например, для двухвходового вентиля $k = 3...4$; p — показатель Рента, зависящий от структуры логических схем. Например, для произвольной логики высокопроизводительных процессоров $p = 0,5...0,75$, для микропроцессорной логики $p < 0,5$.

Число межсоединений N_c определяется суммарным числом выводов n всех M микросхем, устанавливаемых на печатную плату:

$$N_c = zMn,$$

где z — коэффициент разветвления соединений, зависящий от числа нагрузок m в цепях межэлементных связей: $z = m/(m+1)$, так что $0,5 < z < 1$.

Суммарная длина соединений в печатных платах Σl_c определяется числом соединений N_c и средней длиной одного соединения $\bar{l}_c$:

$$\Sigma l_c = N_c \bar{l}_c = iMn.$$

Статистические исследования показывают, что при произвольном размещении микросхем на плате средняя длина одного соединения определяется размером платы:

$$\bar{l}_c \approx 2/3L,$$

где i — коэффициент использования монтажного поля платы выводами микросхем.

Положив $i = 0,5$, оценим суммарную длину соединений в платах

$$\Sigma l_c = 1/3 MnL.$$

Отношения к площади платы L^2 суммарного числа выводов микросхем Mn и суммарной длины соединений Σl_c в ней будем называть соответственно плотностью монтажа и плотностью соединений:

$$P_M = Mn/L^2; \quad (2.1)$$

$$P_c = 1/3 \alpha Mn/L. \quad (2.2)$$

Используя (2.1) и (2.2), получаем соотношение между плотностями соединений и монтажа

$$P_c = 1/3 \alpha P_M L. \quad (2.3)$$

Таким образом, увеличение плотности размещения монтажных элементов и линейных размеров плат требует пропорционального увеличения плотности соединений. С другой стороны, плотность соединений определяется плотностью трассировки, т. е. числом проводников n_{mp} , прокладываемых между отверстиями и коэффициентом использования трасс α , а в МПП — еще и числом сигнальных слоев m_c :

$$P_c = (n_{mp} + 1) \cdot m_c / T, \quad (2.4)$$

Где T — шаг сквозных отверстий, между которыми трассируется n_{mp} проводников.

В односторонних печатных платах единственный слой проводящего рисунка используется для размещения монтажного поля, цепей питания и межсхемных соединений. Поэтому на этих платах невозможно удовлетворить противоречивые требования увеличения плотности монтажа и плотности соединений. Частично эти противоречия разрешаются в двусторонних печатных платах. И только применение МПП позволяет обеспечить специализацию слоев. МПП имеют наружные монтажные слои, которых, естественно, не может быть больше двух ($m_m \leq 2$), m_c сигнальных слоев с ортогональным принципом трассировки проводников в преимущественных направлениях X или Y (m_{cX} и m_{cY} слоев) слои m_z с цепями земли и питания, выполняющие одновременно роль электрических экранов, заземленных по высокой частоте. Экранные слои размещаются между сигнальными, поэтому

$$m_z = m_c - 1, \text{ или } m_z = m_{cX} + m_{cY} - 1.$$

Коэффициент использования трасс принимает значения в пределах $0 < z < 1$ в зависимости от степени взаимной независимости направлений трассировки соединений. Значения z приближаются к единице с увеличением числа переходных отверстий, создающих возможность обхода пересечений трасс. В МПП особенно эффективны межслойные переходы в шаге трасс двусторонних внутренних слоев со строго ортогональной трассировкой.

Таблица 2.9. Коэффициент использования трассировочного пространства

$n_{тр}$	η	
	Внутренние слои без межслойных переходов	Двусторонние слои с межслойными переходами в шаге трасс
1	0,6	0,9
2	0,52	0,82
3	0,45	0,80
4	0,38	0,75

В табл. 2.9 даны значения коэффициента z для сигнальных слоев МПП с различным числом трасс проводников $n_{тр}$ между сквозными отверстиями. Из этих данных видно, что без межслойных переходов увеличение плотности трасс не дает пропорционального эффекта.

Дефицит межслойных переходов проявляется в досадном для технологов явлении: первая пара слоев заполнена проводниками на 80%, вторая только на 30%, третья на 7% и четвертая на 2%. Т.е. усилия производства в увеличении плотности трасс и слойности МПП не вознаграждаются соответствующим увеличением плотности межсоединений при дефиците межслойных соединений. Гораздо эффективнее увеличивать количество межслойных соединений.

2.5. Быстродействие

Производительность, на которую рассчитана система, является ее важным техническим параметром, который следует учитывать при выборе принципа межсоединений. Многие цифровые системы работают на тактовых частотах, приближающихся к 100 МГц, а другие уже давно перешагнули этот порог. Повышение быстродействия систем требует от разработчиков правильного выбора структур межсоединений в печатных платах и материалов, используемых в качестве подложки печатных плат.

2.5.1. Задержка сигналов

Скорость распространения сигнала обратно пропорциональна квадратному корню диэлектрической проницаемости материала подложки. Время распространения сигнала, так называемая конструктивная задержка, прямо пропорционально длине проводников и должно быть как можно меньше, чтобы оптимально обеспечить электрическую производительность системы.

Задержка в линиях связи:

$$\tau = \sqrt{LC} = \tau_0 \sqrt{\epsilon \mu},$$

где τ — конструктивная задержка времени распространения сигнала на единицу длины, L и C — индуктивность и емкость на единицу длины, τ_0 — задержка на единицу длины при передаче сигналов в вакууме (примерно 3,3 нс/м), ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, в которой распространяется сигнал, μ — магнитная проницаемость среды. Поскольку в цепях передачи сигналов используются в большинстве случаев немагнитные материалы (исключения составляют устройства на ферритах), скорость распространения сигналов зависит главным образом от относительной диэлектрической проницаемости, значения которой у современных диэлектриков печатных плат лежат в диапазоне 2,5...6. Следовательно задержка сигналов в линии может превышать 6 нс/м.

Емкостные нагрузки, создающиеся ответвлением трасс, вносят дополнительные задержки сигналов. Поэтому соединения нескольких приемников сигналов, как правило, выполняют не разветвлениями, а последовательным обходом, чтобы предотвратить это рассогласование.

Использование диэлектриков с улучшенными характеристиками дает незначительный выигрыш в задержке. Поэтому в общем случае конструктивная задержка сигналов зависит от длины сигнальных трасс.

2.5.2. Погонная емкость

Емкость проводников (C в $nФ$), отнесенных к единице длины (l в $см$):

- Для проводников, располагаемых в одной плоскости (рис. 2.12):

$$C/l = 0,09(1+\mu)/\lg(1 + 2S/B + B^2/S^2)$$

- Для проводника над экраном:

$$C/l = \mu_r B / 11,3H$$

- Для проводника между экранами (2.13,б):

$$C/l = 0,35\mu_r[(B/H)/(1-A/H)],$$

где B — ширина проводника, $см$; H — толщина межслойной изоляции, $см$; S — расстояние между краями проводников, $см$.

Если толщина печатной платы (H) составляет больше 10% ширины проводника (B), необходимо вводить поправку на краевой эффект добавлением к вычисленному значению погонной емкости значение краевой емкости, значение которой может составлять до 20%.

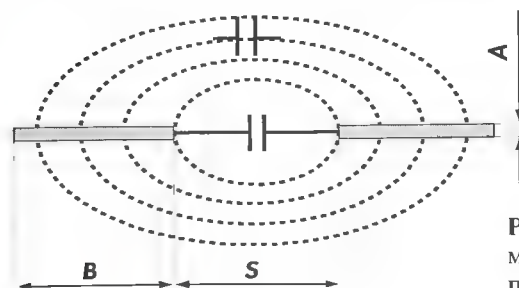


Рис. 2.12. Погонная емкость между проводниками в одной плоскости.

2.5.3. Волновое сопротивление

Для систем, работающих при частоте выше $25 МГц$, межсоединения должны иметь такие характеристики линий передачи, чтобы потери сигналов и искажения были минимальны. Правильный расчет линий передачи требует внимательного учета расстояния между проводниками и экранами и соблюдения точности их размеров, чтобы предотвратить рассогласование линий передач и в, конечном итоге, обеспечить быстродействие системы. Существует два основных типа линий передачи:

- открытые линии, когда сигнальная трасса находится над единственным экраном (рис. 2.13,а);
- закрытые линии, когда сигнальные трассы располагаются между экранами (рис. 2.13, б и в).

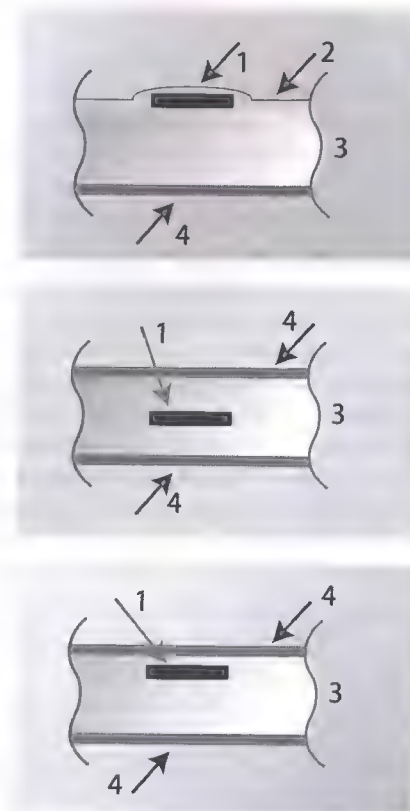


Рис. 2.13. Конфигурации линий связи: а — открытая линия, б — закрытая симметричная линия; в — закрытая ассиметричная линия. 1 — линия связи; 2 — паяльная маска; 3 — диэлектрик; 4 — экран.

И та и другая линии могут быть реализованы только в многослойных структурах, и уже только это определяет необходимость их использования.

Волновое сопротивление (импеданс) линии (Z_0) рассчитывается, исходя из следующих выражений:

- для открытой линии (рис. 2.13,а):

$$Z_0 = k_H \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{6H}{0,83B + A} \right)$$

- для закрытой линии (рис. 2.13, б):

$$Z_0 = k_C q \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2,55H}{B} \right)$$

где B — ширина проводника, см; H — толщина межслойной изоляции, см; A — толщина проводника, см; k_C и k_H — коэффициенты, учитывающие особенности конструкции экранов открытых и закрытых линий; q — коэффициент, учитывающий эксцентриситет положения печатного проводника относительно экранных слоев в закрытых линиях (рис. 2.13,в).

Задача согласования линий связи решается технологическим обеспечением воспроизведения заданного значения их волнового сопротивления, т.е. нормированием всех дестабилизирующих факторов, свойственных производству печатных плат. По результатам анализа влияния этих факторов можно сделать заключение о приемлемости дисперсий волнового сопротивления печатных проводников, реализуемых в производстве печатных плат, или принять решение о необходимости дополнительного контроля всех или отдельных конструктивных параметров печатных плат, оказывающих наибольшее влияние на разброс волнового сопротивления, если эта величина больше приемлемого допуска. По результатам дисперсионного анализа реального производства можно сделать заключение, что при соблюдении обычных норм контроля за технологическим процессом обеспечивается погрешность воспроизведения волнового сопротивления линий связи в МПП в пределах $\pm 15\%$, при управлении процессом воспроизводства ширины проводников и толщины межслойной изоляции — 8...10%.

2.6. Энергопотребление

Увеличение производительности электронных устройств и интеграции микросхем приводит к соответствующему увеличению энергопотребления. Некоторые микросхемы потребляют до 30 Вт. Такая мощность потребления в сочетании с низким напряжением питания делает узлы и блоки электронных систем чувствительными к, так называемым, перекосам напряжения в пределах одной платы. Это обуславливает задачу обеспечения равномерного распределения питания и заземления в платах за счет низкого сопротивления этих цепей, работающих при напряжениях 5; 3,3; 2,8 В.

2.6.1. Цепи питания

Очевидно, что цепи питания должны иметь низкоомное сопротивление, чтобы распределение потенциалов было равномерным по всей плоскости платы. В некоторых случаях требуются даже отдельные навесные шины, чтобы избежать заметного падения напряжения питания в схемах с мощным энергопотреблением.

Но кроме низкого сопротивления от цепей питания и заземления требуется еще и низкая индуктивность для ослабления импульсных помех, определяемых скоростью переключения в схемах с высоким быстродействием. В двусторонних платах цепи питания неизбежно имеют большой контур потокоцепления, а значит и большую индуктивность.

Наиболее удачно эти проблемы решаются в МПП, изготавливаемых методом металлизации сквозных отверстий, где есть возможность выделить для цепей земли и питания отдельные слои, играющие одновременно роль электрических экранов, заземленных по высокой частоте. Вместе с тем, экраны, выполненные в виде параллельных металлических плоскостей, имеют хорошую развязывающую емкость и низкую индуктивность за счет ничтожно малой площади контура, сосредоточенного между слоями земли и питания.

2.6.2. Сопротивление цепей

Расчет сопротивления печатных проводников при проектировании печатных плат требуется в основном для того, чтобы избежать недопустимо большого падения напряжения в сигнальных и потенциальных

цепях, которое может приводить к потере мощности сигнала и к неравномерному распределению («перекосам») напряжения питания по рабочему полю платы, перегреву слабых элементов соединений. При тестировании печатных плат омическое сопротивление элементов соединений может служить критерием их качества.

Расчет сопротивления элементов соединений производится, исходя из общеизвестных соотношений. Применительно к плоским проводникам печатных плат и размерностям, используемым в технике печатного монтажа, можно использовать соотношение:

$$r = 17,5/BA,$$

где r — погонное сопротивление, мОм/мм ; B — ширина проводника, мм ; A — толщина фольги, мкм .

Таблица 2.10. Реальные значения металлической толщины проводников.

Масса единицы площади		Номинальная толщина, мкм	Толщина на внутренних слоях (без металлизации), мкм	Толщина на внешних слоях после металлизации, мкм
Унция/кв.фут	г/кв.м			
0,5 oz	152,5	17,2	12	45
1 oz	305	34,3	28	60
2 oz	610	68,6	64	100
3 oz	915	103,0	98	130
4 oz	1220	137,0	130	170

Исследования показывают, что в ряде случаев результаты расчетов сопротивлений элементов соединений по их геометрии и стандартным удельным характеристикам материалов не полностью соответствуют реальным значениям. Это объясняется наличием множества побочных факторов. Основными из них являются значительные разбросы геометрических характеристик элементов соединений, отличие удельных сопротивлений химической и гальванической металлизации в отверстиях и на проводниках от известного значения для натуральной металлической меди, Ом·см : чистая отожженная медь — $1,72 \cdot 10^{-6}$, медная фольга — $1,75 \cdot 10^{-6}$, медное гальванопок-

рытие — $(1,8...2,5) \cdot 10^{-6}$, химически осажденная медь — $(2...100) \cdot 10^{-6}$. Поэтому поиски точных расчетных соотношений для определения активного сопротивления элементов соединений печатных плат не оправданы. В табл. 2.10 показано, например, как отличается толщина реальных проводников от номинальных значений толщины фольги.

2.6.3. Токонесущая способность проводников

Для надежной работы необходимо, чтобы нагрев проводников под действием тока не приводил к физико-химическим изменениям, как в элементах соединений, так и в окружающем их диэлектрике. Сами печатные проводники, благодаря своей плоской форме, хорошо отдают тепло и допускают большие плотности тока без каких-либо для них последствий. Поэтому площади поперечного сечения проводников определяются, в первую очередь, необходимостью обеспечить низкое сопротивление цепей. И если это обеспечено, токонесущая способность проводников будет обеспечена с большим запасом. Чаще всего с ограниченной токонесущей способностью проводников приходится считаться в точках ввода питания в плату, откуда большие токи распределяются по соответствующим цепям. Если этих точек мало, и они не распределены по периметру платы, могут возникнуть локальные температурные перегрузки, вызывающие термодеструкцию диэлектрика. С другой стороны, большие сечения проводников в местах токоподвода затрудняют пайку. Поэтому лучше иметь много маломощных вводов, чем один мощный.

О токонесущей способности проводников чаще приходится говорить при тестировании плат когда для диагностики надежности используют нагрузку тестируемых цепей большими токами.

Чтобы учесть все факторы, влияющие на кинетику нагрева проводников током, представим физическую модель, условно показанную на рис. 2.14.

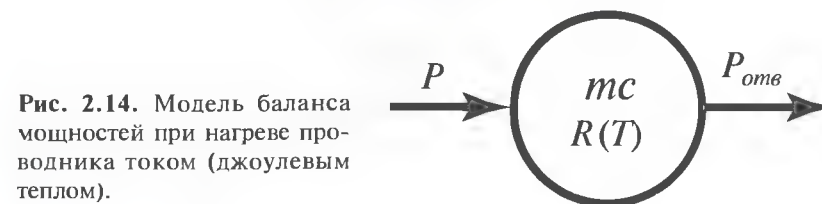


Рис. 2.14. Модель баланса мощностей при нагреве проводника током (джоулевым теплом).

Условно выделенный элемент проводника с массой m и удельной теплоемкостью c имеет в исходном состоянии при температуре окружающей среды T_0 сопротивление r_0 . При прохождении через проводник тока i на сопротивлении r_0 выделяется мощность P . Температура проводника повышается на T . Условия теплоотдачи проводника определяется тепловым сопротивлением F . Нагрев проводника вызывает дополнительное увеличение сопротивления, соответствующее температурному коэффициенту сопротивления.

Взаимосвязи термодинамического процесса нагрева проводника можно описать системой уравнений:

$P(t) = I^2 R_0 [1 + T(t)]$ — мощность, выделяемая на сопротивлении проводника $R(t)$, зависящим от температуры перегрева $T(t)$ относительно первоначальной температуры окружающей среды; $T(t) = T(t) - T_0$ — перегрев проводника относительно первоначальной температуры окружающей среды T_0 ; $T(t) = Q(t)/c$ — температура проводника, где $Q(t) = \int_0^t \Delta P(t) dt$ — количество тепла, накапливаемое в элементе проводника;

$P(t) = P(t) - P_{отв}(t)$ — разность между выделяемой $P(t)$ (джоулевым теплом) и отводимой $P_{отв}(t)$ (теплоотдача) мощностями, обуславливающая изменение температуры элемента проводника $T(t)$; $P_{отв}(t) = T(t)/F$ — мощность, отводимая от элемента проводника (теплоотдача) через тепловое сопротивление F .

Уравнение, связывающее выделяемую мощность с накапливаемой в теплоемкости элемента и отводимой через тепловое сопротивление, можно представить следующим образом:

$$I^2 R_0 [1 + T(t)] dt = mcd[T(t)] + [T(t)/F] dt \quad (2.5)$$

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$T(t) = T_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}); \quad (2.6)$$

$$T_{\infty} = \lim [T(t)]_{t \rightarrow \infty} = I^2 R_0 F_{\infty} / (1 - I^2 R_0 F_{\infty} \alpha) \quad (2.7)$$

где F_{∞} — тепловое сопротивление в установившемся режиме; τ — постоянная времени термодинамического процесса нагрева, равная

$$\tau = mcF / (1 - I^2 R_0 F_{\infty} \alpha) \quad (2.8)$$

Начальная скорость нарастания температуры

$$\Delta T(t)|_{t \rightarrow 0} = \frac{d[\Delta T(t)]}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = \frac{I^2 R_0}{mc} t \quad (2.9)$$

т.е. в начальной стадии нагрев проводника током — процесс адиабатический, не зависящий от характеристик внешней среды, окружающей проводник. Характер дальнейшего развития процесса нагрева зависит от знака корня уравнения (1) $p = I^2 R_0 F \alpha$ (рис. 2.15): при $p > 0$ процесс сводится к установившемуся значению (3), а изменение температуры во времени

$$\Delta T(t) = \frac{I^2 R_0 F}{(1 - I^2 R_0 F \alpha)} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (2.10)$$

при $p < 0$ температура проводника неограниченно растет, пока не будет выключен ток или не перегорит проводник;

при $p = 0$ процесс нагрева характеризуется линейным во времени возрастанием температуры:

$$\Delta T(t) = I^2 R_0 t / mc \quad (2.11)$$

Линейный режим является граничным между устойчивым и неустойчивым режимами нагрева. Поэтому он определяет критическое значение тока:

$$I_{крит} = 1 / \sqrt{R_0 F \alpha} \quad (2.12)$$

Если ток не ограничивается во времени и превышает значение $I_{крит}$, то происходит разрушение соединения (перегорание). Процесс остывания проводника при $I = 0$ характеризуется постоянной времени

$$\tau_0 = mcF \quad (2.13)$$

и определяется выражением:

$$\Delta T(t)|_{I=0} = T_{max} \exp(-t/\tau_0) \quad (2.14)$$

где ΔT_{max} — температура, на которую был нагрет проводник в момент выключения тока.

Тепловое сопротивление F и теплоемкость mc связаны с геометрией проводника, характеристикой окружающей его среды и харак-

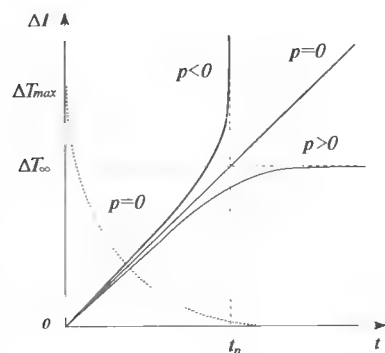


Рис. 2.15. Качественные характеристики нагружения соединений током.

тером процесса нагрева проводника. В установившемся процессе нагрева, когда тепловыделение и теплоотдача уравниваются, тепловое сопротивление теплоотдачи связано, в основном, с сопротивлением от поверхности платы в окружающую среду, так как тепловое сопротивление диэлектрика в этой теплопередаче составляет доли градуса.

В переходном режиме тепловое сопротивление и теплоемкость меняются во времени. В начальный момент времени, после включения тока, тепловое сопротивление теплоотвода определяется сопротивлением теплопередачи от нагревающегося проводника в область диэлектрика, находящуюся в непосредственной близости от его поверхности. В этот момент нагревается преимущественно тело элемента проводника, т.е. процесс нагрева близок к адиабатическому (квазиадиабатическому). С течением времени нагреваются все большие и большие массы материала вокруг проводника, границы теплоотвода отодвигаются, следовательно, меняются значения теплоемкости $C(t) = m(t)c$ и теплового сопротивления $F(t)$. Стадии нагрева проводника током показаны на рис. 2.16.

Для удобства расчетов максимальной температуры перегрева можно воспользоваться упрощенным соотношением:

$$T_{\infty} = J^2 B / I,$$

где J — плотность тока, A/mm^2 ; B — ширина проводника, mm ; I — коэффициент теплопередачи, средние значения которого:

- для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП составляет $150...200 A^2/(mm \cdot K)$;
- для проводников внутренних слоев МПП — $250...320 A^2/(mm \cdot K)$.

2.7. Элементы кондуктивного теплоотвода

Вся энергия, подводимая для питания интегральных микросхем (ИС), должна быть эффективно выведена из системы, чтобы обеспечить ее работоспособность в течение длительного времени. Отвод тепла от системы является одной из самых трудных задач при разработке конструкций электронных устройств. В большинстве из них для отвода тепла используют огромные по сравнению с размерами микросхем радиаторы, часто снабженные дополнительным вентилятором (куллер), а в некоторых применяют гигантские системы с жидкостным охлаждением. Реально существуют даже системы с погружным охлаждением. И чем меньше по объему электронные устройства, тем большие плотности энергии в них сосредотачиваются и тем сложнее вывести это тепло во внешнюю среду, иначе устройство просто сгорит. Поэтому наряду с электрическим конструированием приходится считаться с проблемами теплового конструирования электронной аппаратуры.

Хотя сами по себе печатные платы не являются источником нагрева, компоненты, смонтированные на них нуждаются в отводе тепла. Конечно, если используется воздушное или погружное охлаждение, печатные платы выполняют пассивную роль. От них требуется лишь устойчивость к воздействию внешней среды, которую несет внутрь аппаратуры воздушный поток или среда погружения. Конструкция печатной платы

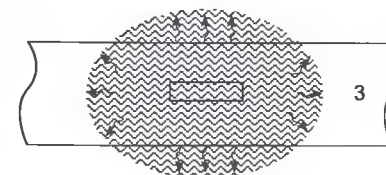
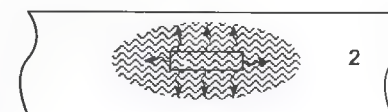
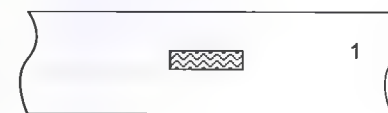


Рис. 2.16. Стадии нагрева проводника током.

1-я Стадия: I — адиабатический процесс нагрева проводника массой m_1 с теплоемкостью c_1 ;

2-я Стадия: II — теплоперенос от проводника в объем диэлектрика: m_2, c_2, F_2 ;

3-я Стадия: III — теплопередача во внешнюю среду: m_3, c_3, F_3 .

становится активной в теплопередаче, если в нее введены элементы кондуктивного теплоотвода: сквозные технологические отверстия или навесные металлические шины, на которые устанавливаются теплонагруженные компоненты, теплоотводящие слои (керны) с выходом на периферию платы с тепловыми клиньями для теплопередачи на корпус устройства (рис. 2.17). Тогда платы можно физически изолировать от внешней среды и избежать тем самым ее вредного воздействия на надежность печатных узлов или ослабить защиту плат от внешних воздействий.

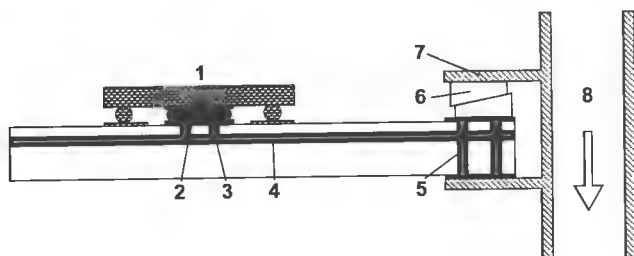


Рис. 2.17. Схема кондуктивного теплоотвода. 1 — компонент, рассеивающий мощность, 2 — теплопроводящая клеящая прокладка, 3 — металлонаполненный переход с теплоотводящей площадкой на теплоотводящий внутренний слой (кern). 5 — сквозные металлонаполненные переходы, 6 — тепловые клинья, 7 — полочки корпуса-направляющие, принимающие подведенное тепло, 8 — канал охлаждения полого корпуса.

2.8. Себестоимость

Себестоимость конечного продукта стала наиболее важным критерием при разработке любых электронных систем. Независимо оттого, что при разработке следует учитывать все функциональные и эксплуатационные требования, все же определяющим критерием для инженера-разработчика должна оставаться себестоимость, и он должен анализировать все возможные компромиссы в целях достижения наилучшего соотношения цена/качество конечного продукта.

Учет требований процессов производства печатных плат и сборки печатных узлов в процессе разработки изделия может обеспечить

снижение расходов на сборку на 35 %, а себестоимости печатных плат — на 25 %.

Структура прямых расходов на производство печатных плат, определяющая их себестоимость, показана в табл. 2.11. Наиболее большие затраты приходятся на базовые материалы и инструмент. Тем более, что здесь приведены данные, связанные с импортом. Использование импортных поставок удорожает печатные платы на 50...60% относительно их себестоимости за рубежом, но создает устойчивость производства и качества, что всегда больше ценится производителем: меньше издержек на брак при изготовлении и сборке, большие гарантии надежности, возможность своевременного выполнения заказа и др.

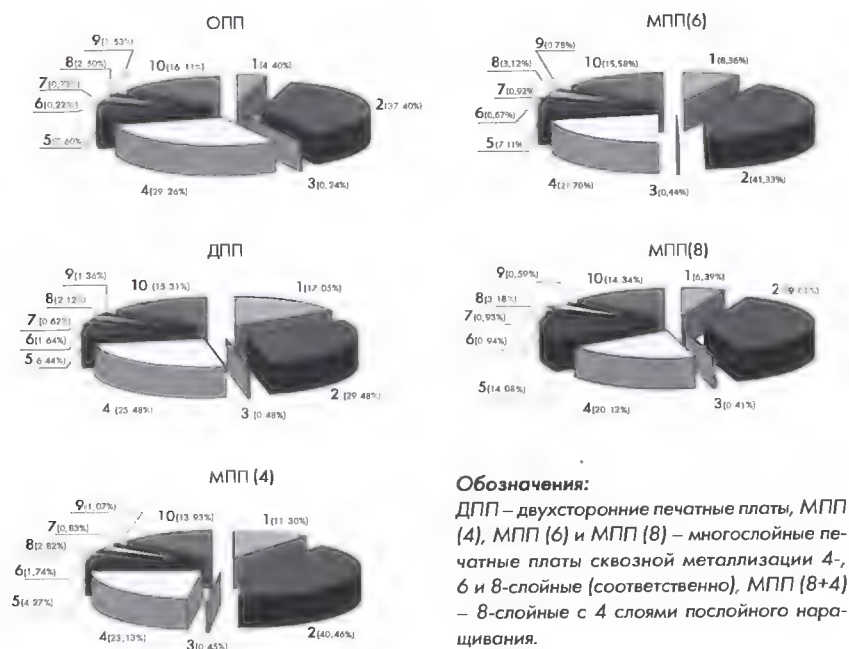
Таблица 2.11. Примерное распределение прямых расходов (без учета амортизации оборудования) на производство печатных плат (Россия, 2004 г.).

Страны (2004 г.)	Оплата труда (с накладными расходами)	Стоимость энергоресурсов и инструмента	Стоимость материалов
Германия	40	26	30
Россия	21	7	55 (импорт) 38 (отечественные)

Обозначения: ДПП — двухсторонние печатные платы, МПП (4), МПП (6) и МПП (8) — многослойные печатные платы сквозной металлизации 4-, 6 и 8-слойные (соответственно), МПП (8+4) — 8-слойные с 4 слоями послойного наращивания.

Из таблицы можно увидеть, что в первых строчках расходов стоят материалы и инструмент. Трудозатраты, энерго- и водообеспечение не занимают большой доли в себестоимости плат, что выгодно отличает отечественное производство от зарубежного. В табл. 2.12 показаны сравнительные характеристики этих статей расхода, чтобы видеть, как может позиционироваться Российская электронная индустрия в международном разделении труда. Из анализа этих данных (2004 г.) становится очевидной актуальность организации высококачественного отечественного производства полуфабрикатов, инструмента и материалов для производства печатных плат.

Рис. 2.18. Примерное распределение прямых расходов (без учета амортизации оборудования) на производство печатных плат (Россия, 2004 г).



Обозначения:

ДПП – двухсторонние печатные платы, МПП (4), МПП (6) и МПП (8) – многослойные печатные платы сквозной металлизации 4-, 6 и 8-слойные (соответственно), МПП (8+4) – 8-слойные с 4 слоями послойного наращивания.

1. Расходы на химию
2. Базовые материалы
3. Фотошаблоны
4. Фотолитография/ТП
5. Инструмент/штампы
6. Трафаретные печатные формы
7. Холодная вода
8. Горячая вода для промывки
9. Электроэнергия
10. Трудозатраты

ГЛАВА 3

БАЗОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Общие понятия

Базовыми материалами принято называть те, что остаются в конструкции печатных плат. В этом смысле можно было бы назвать базовыми материалы оснований, металлизации, паяльные маски и т.д. Но этим понятием «базовые материалы» ограничились круг материалов — оснований печатных плат (синонимы: монтажная подложка, диэлектрическое основание).

Характеристики печатного монтажа в значительной степени определяются свойствами базовых материалов. В качестве их обычно используются фольгированные медью (для субтрактивной технологии) листы диэлектрика: полимеры или композиционные материалы — слоистые прессованные пластики различного типа, армированные всевозможными волокнами на основе бумаги (гетинаксы), стеклоткани (стеклотекстолиты), ткани из полиэфирных волокон, стеклошпон, кварцевые ткани и т.п. В композиционных материалах в качестве связующего элемента используются всевозможные смолы, обладающие хорошей адгезией к медной фольге, стойкие к воздействию агрессивных растворов, используемых в производстве печатных плат, устойчивые к температурам пайки, обеспечивающие приемлемый коэффициент температурного расширения.

Основания печатных плат могут быть жесткими или гибкими. В ряде конструкций печатных плат используются материалы, находящиеся первоначально в жидком или пастообразном состоянии. В объем диэлектрического основания могут быть введены добавки, придающие им особые свойства, — катализаторы для аддитивных и фотоаддитивных процессов, фирменные знаки (логотипы) и идентификаторы, ультрафиолетовая блокировка, делающая основание непрозрачным, что необходимо при двустороннем экспонировании паяльной маски и т.д.

3.2. Фольги

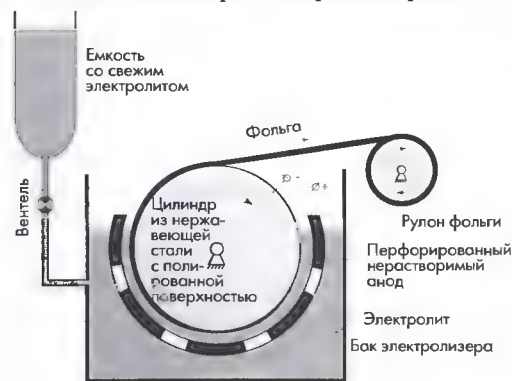
В производстве печатных плат в подавляющем большинстве случаев используют медную фольгу. В редких специальных случаях раньше применяли никелевую фольгу или нержавеющую сталь, когда печатная плата предназначалась для приварки выводов компонентов и проводов.

Исключительное использование меди обусловлено ее хорошей проводимостью, способностью принимать на себя другие покрытия, хорошей пластичностью и, что очень важно, однородностью с материалами металлизации элементов межсоединений (сквозных и глухих отверстий), которые тоже выполняются медью.

Получить тонкую медную фольгу — технически сложная задача, решаемая рядом конкурирующих способов: стандартная электролитическая, высокопластичная электролитическая, отожженная электролитическая, горячекатаная, холоднокатаная, отожженная катанная, катанная с последующим низкотемпературным отжигом.

3.2.1. Электролитическая фольга (ED foil — electrodeposited copper foil)

В производстве электролитической медной фольги используются традиционные процессы осаждения меди из сернокислого электролита на полированную поверхность вращающегося барабана сделанного из нержавеющей стали или титана (рис. 3.1). В результате осаждения со стороны барабана фольга получает ровную блестящую



поверхность, со стороны электролита получается матовая поверхность. Как правило, матовой стороной фольга припрессовывается к диэлектрическому основанию, чем обеспечивается

Рис. 3.1. Схема изготовления электролитической фольги.

хорошая адгезия фольги с диэлектриком. В свою очередь, ровная блестящая поверхность способствует хорошему воспроизведению тонкого рисунка проводников и зазоров.

Для выполнения предъявляемых требований к размерной устойчивости внутренних слоев МПП электролитическую фольгу отжигают и, тем самым снимают с нее внутренние напряжения. Кроме того, отжиг фольги способствует равномерности подтравливания рисунка при использовании процессов металлизации и последующего травления.

Электролитическую фольгу дополнительно обрабатывают для улучшения ее свойств применительно к производству печатных плат.

3.2.1.1. Шероховатость

Эта обработка первично получается при электролитическом осаждении фольги. Дополнительно ее оксидируют в анодном процессе. Этот оксидный слой — очень тонкий, но его наличие значительно улучшает адгезию фольги к таким материалам, как полиимид, цианатный полиэфир, полибисмалеимид и др.

На рис. 3.2 показано сечение стандартного фольгированного материала, в котором фольга припрессована к диэлектрику шероховатой оксидированной стороной, при этом внешняя сторона фольги — блестящая.

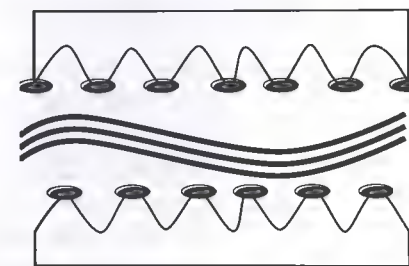


Рис. 3.2. Стандартный фольгированный материал

3.2.1.2. Покрyтия, создающие термический барьер

Покрyтия цинком, никелем или бронзой по зерненной поверхности увеличивают химическую и термическую устойчивость сцепления фольги с диэлектриком в процессе производства фольгированных материалов, печатных плат и монтажа электронных узлов. Эти покрытия, толщиной в сотые доли микрона, можно увидеть на внутренней поверхности фольги по характерному для покрытия цвету: коричневый, серый или цвета желтой горчицы.

3.2.1.3. Пассивационные и антиоксидантные покрытия

В отличие от других покрытий, эта обработка производится с двух сторон фольги. Она предотвращает процессы коррозии при хранении и изготовлении фольгированных материалов. Толщина этого покрытия порядка 100 Ангстрем, в дальнейшем оно удаляется в процессе очистки, травления или механической зачистки, с которых начинается любой процесс в производстве печатных плат.

3.2.1.4. Аппретирование

Обычно используют кремнийорганический аппрет, при нанесении на внутреннюю поверхность фольги он способствует лучшей адгезии фольги со связующим и позволяет предотвращать коррозию.

3.2.2. Фольги с обработкой обратной стороны (RTF – Reverse-treated foil)

Это те же электролитические фольги, но с обработкой гладкой поверхности таким образом, чтобы она получила развитую тонкопрофильную поверхность. Эта поверхность с минимальной шероховатостью не препятствует формированию тонких проводников, но обеспечивает хорошую адгезию фоторезиста и скрепление слоев в МПП. Тонкий профиль шероховатости позволяет также изготавливать ультратонкие фольгированные материалы, которые нельзя было бы сделать, если бы большие шероховатости фольги продавливали тонкий диэлектрик, вплоть до смыкания (рис. 3.3).

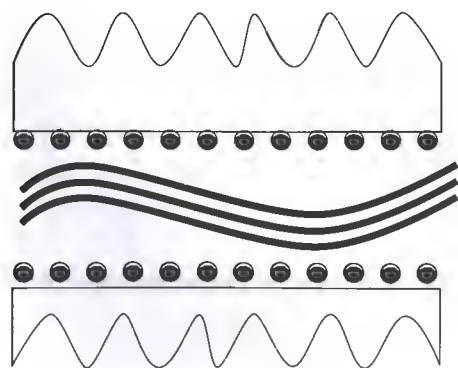


Рис. 3.3. Фольгированный диэлектрик с RTF-фольгой

3.2.3. Отожженная катаная фольга

При этом способе изготовления фольга проходит серию последовательных операций отжига и проката до нужной толщины. После последней стадии отжига фольга имеет очень хорошую пластичность, позволяющую использовать ее в гибких конструкциях плат, и низкий уровень шероховатости, меньше чем у электролитической фольги.

3.2.4. Другие типы фольг

3.2.4.1. Фольга с двусторонней обработкой (DTF – Double-Treated Copper Foil)

Это та же фольга, что и с обработкой обратной стороны, но она припрессовывается к диэлектрику тонкопрофильной стороной. Сторона с грубой поверхностью, наращиваемой из электролита меднения, становится внешней стороной фольгированного диэлектрика (рис. 3.3). Естественно, что развитая внешняя поверхность фольги обеспечивает особо прочную связь в пакете слоев МПП. Следует, однако, иметь ввиду, что шероховатая поверхность, полученная из электролита, очень активна захватывает всевозможные загрязнения, а механическая очистка такой поверхности затруднена из-за большого количества пазух. Поэтому, для использования фольгированных материалов с обработанной с двух сторон фольгой, нужны специальные условия.

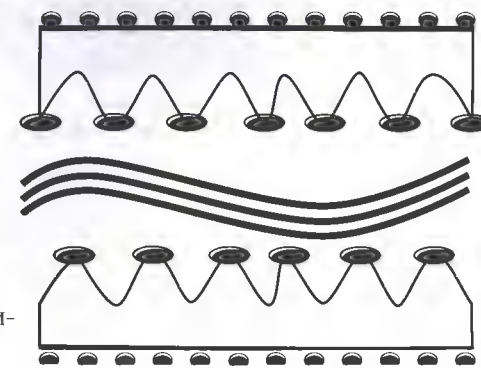


Рис. 3.4. Фольгированный диэлектрик с DTF-фольгой

3.2.4.2. Тонкомерная фольга

Для изготовления печатных плат с тонким рисунком большой плотности выпускаются диэлектрики, облицованные сверхтонкой (5...7 мкм) медной фольгой. Для предохранения такого слоя меди от окисления и механических повреждений ее защищают протектором. В качестве протектора часто используют листовой алюминий, на который, собственно, осаждают тем или другим способом тонкий слой меди. Алюминиевую поверхность нет необходимости специально обрабатывать, чтобы отделить ее от меди, не повредить ее. В ходе изготовления протектор отделяется непосредственно перед процессами печати. Поэтому тонкая медь фольги остается нетронутой в течение всего срока жизни фольгированного материала.

Предлагается еще более удобный в использовании трехслойный материал САС: медь-алюминий-медь. Алюминиевый лист осуществляет в пресс-пакете МПП функцию разделительного листа, а медные слои представляет собой наружные слои МПП (рис. 3.5).

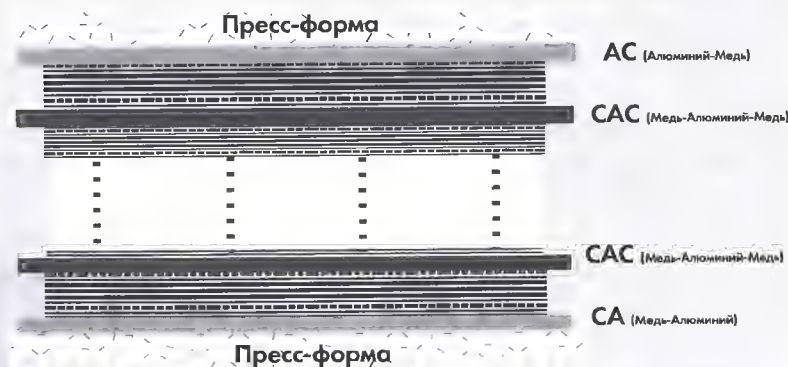


Рис. 3.5. Трехслойный материал САС в пресс-пакете МПП

Кроме вышеперечисленных преимуществ использования тонкомерной фольги, САС более удобен в применении, повышает уровень качества печатных плат. Жесткая основа предотвращает образование складок тонкой фольги при укладке пакета.

Он сохраняет качество поверхности наружных слоев МПП на всех этапах изготовления, от раскроя до металлизации отверстий. Отсутствует необходимость в операции зачистки прокладочных (разделительных) листов. Основа САС — лист алюминия — позволяет использовать его в дальнейшем, в качестве верхней прокладки при сверлении после разборки спрессованных пакетов МПП.

3.2.4.3. Резистивные фольги

Эти фольги используются для формирования резисторов на внутренних слоях МПП. Эта фольга двухслойная, состоящая из меди и резистивного материала. При изготовлении печатных плат со встроенными резисторами сначала вытравливаются печатные проводники из медной части этой фольги, а затем плоские резисторы из резистивной части фольги. Естественно, что травящие растворы для этих слоев должны быть разными.

Использование встроенных в плату резисторов улучшает надежность и увеличивает плотность компоновки активных элементов, снижает себестоимость плат.

3.2.4.4. Фольги из других металлов

Хотя и редко, но все же применяются и другие виды фольг: алюминиевая и никелевая. Их применение обусловлено возможностью использования микросварки для теплонагруженных конструкций аппаратуры, где паяные соединения разрушаются. При использовании микросварки верхний предел температур определяется нагревостойкостью основания. А она может быть высокой, если использовать такие связующие, как полиимид и т.п.

3.3. Связующие

3.3.1. Общие сведения о связующих

3.3.1.1. Полимеры

Среди материалов, используемых для изготовления диэлектрических оснований печатных плат, большинство — органические вещества, т.е. соединения, содержащие связанные между собой атомы углерода.

Наибольшую популярность получили органические электроизоляционные материалы на основе **высокомолекулярных** соединений — органических веществ с чрезвычайно большими молекулами, содержащими иногда многие тысячи атомов. Такие высокомолекулярные соединения в земных условиях могут образовывать только углеводородные цепи. Молекулярный вес таких веществ доходит до 10^6 , а геометрические размеры молекул настолько велики, что они могут образовывать прочные волокна и нити. К высокомолекулярным соединениям принадлежат многие смолы, целлюлоза и ее производные: шелк, каучук и т. п.

По химической природе, многие из искусственных высокомолекулярных соединений представляют собой **полимеры**, т.е. вещества, молекулы которых получаются при соединении друг с другом большого числа молекул более простых по составу веществ, так называемых **мономеров**. Реакция образования полимеров из мономеров носит общее название **полимеризации**.

Процесс полимеризации может быть значительно ускорен различными факторами (повышение температуры, освещение, присутствие катализаторов, радиоактивное и электронное облучение и т. д.).

Молекулы полимера образуются из одинаковых молекул мономера. Все их атомы полностью входят в состав молекул полимера. Такова, например, полимеризация стирола в полистирол или этилена в полиэтилен.

Но могут быть и более сложные случаи полимеризации: совместная полимеризация нескольких мономеров различного состава. Например, совместная полимеризация стирола и этилена (сополимеризация), которая заимствует от полиэтилена ударопрочность, а от полистирола — жесткость.

Отдельный тип реакций образования высокомолекулярных соединений — поликонденсация, т.е. полимеризация, связанная с перегруппировкой атомов полимеров и выделением из сферы реакции воды или других низкомолекулярных веществ. Такие смолы называют конденсационными в отличие от полимеризационных. Например, результатом реакции поликонденсации формальдегида и фенола, проходящей с выделением воды, является фенолоформальдегидная смола — основа всех гетинаксов.

3.3.1.2. Строение молекул полимеров

По строению молекул полимеры делятся на два класса — линейные и пространственные полимеры (рис. 3.6).

У линейных полимеров отношение длины молекулы к ее поперечным размерам чрезвычайно велико и может быть порядка 1000. Так, молекула полистирола с $n = 6000$ имеет длину около $1,5 \cdot 10^{-4}$ см при поперечнике $1,5 \cdot 10^{-7}$ см; молекулы каучука и целлюлозы имеют длину $(4 - 8) \cdot 10^{-5}$ см при поперечнике $(3 - 7,5) \cdot 10^{-8}$ см.

Молекулы пространственных полимеров развиты в пространстве в разных направлениях.

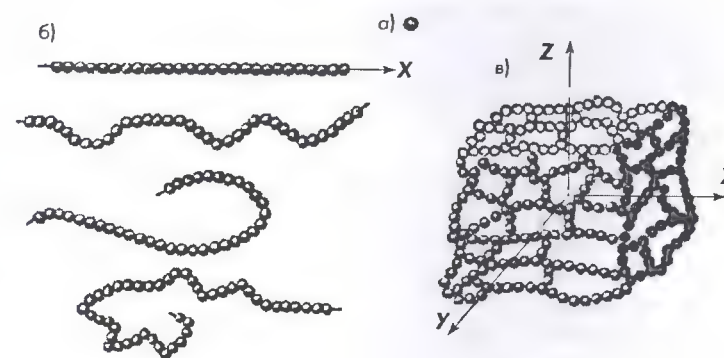


Рис. 3.6. Строение молекул высокомолекулярных органических соединений: а — мономер, б — линейные полимерные молекулы, в — пространственная полимерная молекула.

Легко понять основную закономерность, которая определяет образование линейных или же пространственных полимеров. Если молекулы мономеров имеют только по две реактивные точки, т.е. две валентности, способные освободиться и соединиться с другими молекулами, то в результате полимеризации получится линейный полимер — цепочка, не могущая иметь никаких разветвлений. Это мы видим на примере этилена, молекула которого имеет две реактивные точки. Если же объединяются мономерные молекулы, из которых хотя бы часть имеет три (или более) реактивные точки, то возможно получение разветвленного строения, свойственного пространственным полимерам.

Между свойствами линейных и пространственных полимеров имеются существенные различия.

Как правило, линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны; многие из них при умеренном повышении температуры легко размягчаются и расплавляются. Пространственные полимеры обладают большой жесткостью, расплавление их происходит лишь при высоких температурах, а многие из них ранее достижения температуры плавления разрушаются химически (сгорают, обугливаются и т. п.).

Линейные полимеры могут иметь аморфное или кристаллическое строение. В первом случае молекулы расположены беспорядочно, и полимер может быть жестким или эластичным.

При кристаллическом строении наблюдается частично упорядоченное расположение молекул; это может быть в материалах при низких температурах, а в некоторых соединениях и при нормальной температуре.

Со строением полимеров связана их способность образовывать при вытягивании из растворов или расплавов тонкие, гибкие и прочные нити (волокна), пригодные для изготовления текстильных материалов, а также пленки. Такой способностью обладают многие из линейных полимеров с достаточно длинными молекулами (полистирол, полихлорвинил, эфиры целлюлозы, капрон и пр.); пространственные полимеры не могут образовывать текстильных волокон.

Линейные полимеры в большинстве случаев способны растворяться в подходящих по составу растворителях. Пространственные полимеры с трудом поддаются растворению, а многие из них практически нерастворимы. В связи с этими свойствами, линейные полимеры в практике называют термопластичными материалами, а пространственные — термореактивными.

3.3.1.3. Стадии отверждения полимеров

Термореактивные полимеры при отверждении проходят три стадии:

стадия А — исходные продукты полимеризации смешаны и готовы вступить в реакцию при нагреве. Без нагрева реакция тоже идет, но медленно. Как правило, исходная смесь растворена в растворителях, замедляющих взаимодействие исходных продуктов;

стадия В — из исходной смеси удалены растворители; продукты вступили в реакцию полимеризации, но она находится только в на-

чальной стадии. В этой стадии продукты еще способны растворяться, плавиться, формоваться. Без растворителя они представляют собой сухие продукты. Они не слипаются, поэтому способны к затариванию и транспортировке;

стадия С — реакции полимеризации завершены и продукты более не способны пластически менять форму, плавиться, растворяться. Продукт в стадии С теряет способность к переработке. Его формы устойчивы. При нагреве они только деструктурируют (разрушаются, горят).

3.3.1.4. Общие свойства полимеров

Гигроскопичность и электрические свойства полимеров зависят от их состава и строения. Вещества с несимметрично построенными звеньями полимерных молекул являются дипольными и обычно обладают известной гигроскопичностью, невысокими или средними электрическими характеристиками. Высокомолекулярные углеводороды с симметрично построенными молекулами практически нейтральны или слабополярны, гигроскопичность их ничтожно мала, а потому они имеют малое значение тангенса угла диэлектрических потерь и низкую электропроводность.

Высокомолекулярные соединения — линейные или пространственные полимеры, при всем разнообразии их происхождения и свойств, характеризующиеся сходным строением и некоторыми общими физическими свойствами, получили название **синтетических смол**.

Большинство **конденсационных** смол при их использовании для целей электрической изоляции проявляют общий недостаток, выражающийся в том, что при отвердевании они выделяют воду или другие летучие вещества, остатки которых в смоле увеличивают ее электропроводность. Мало того, если все таки предпринять попытки удалить эти продукты, пути их выхода из объема становятся каналами для входа влаги. Кроме того, молекулы конденсационных смол содержат полярные группы, что повышает в них диэлектрические потери и гигроскопичность. Исключения составляют такие смолы, как эпоксидная, не выделяющая при полимеризации побочных продуктов. Полимеризационные же смолы как неполярные (например, полиэтилен, полистирол) так и полярные (например, полихлорвинил) не содержат в своем объеме побочных продуктов реакций.

3.3.2. Температурные фазовые переходы в полимерах

Как известно, аморфные высокомолекулярные соединения (к ним относятся все типы связующего в слоистых пластиках) имеют в общем случае три физических состояния, определяемых соотношением энергий теплового движения макромолекул и их звеньев и энергий взаимодействия макромолекул между собой (стеклообразное, высокоэластичное, вязкотекучее). Физически состояния смол характеризуются следующими температурными переходами (рис. 3.7): T_g — температура стеклования — температурная область, ниже которой подвижность макромолекул и скорость их конформационной релаксации минимальны и полимер находится в стеклообразном состоянии; T_f — температура текучести — температура, выше которой полимер находится в вязкотекучем состоянии и у макромолекул за счет повышения их подвижности и уменьшения межмолекулярного взаимодействия появляется возможность перемещения одной относительно другой.

Область, заключенная между T_g и T_f , называется областью высокоэластичного состояния, в которой энергия теплового движения макромолекул и их звеньев достаточно велика для проявления их гибкости и увеличения скорости релаксационных процессов, но еще недостаточна для перемещения макромолекул относительно одна другой. Нахождение смолы в том или ином состоянии зависит от его химического строения, температуры окружающей среды, молекулярной массы, наличия пластифицирующих добавок. Увеличение молекулярной массы не сказывается на изменении T_g , однако повышает T_f и расширяет область высокоэластичного состояния. С уменьшением молекулярной массы T_f резко снижается и в ряде случаев (например, для фенольных смол) совпадает с T_g .

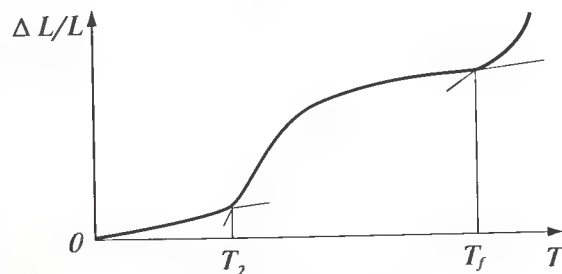


Рис. 3.7. Фазовые переходы полимеров

На рис. 3.6 фазовые переходы связаны с линейным расширением полимера так, что до температуры стеклования T_g оно минимально и после T_g резко возрастает. Поэтому значение температуры стеклования — важный параметр диэлектрических подложек, характеризующий устойчивость композиции медь-диэлектрик к температурным воздействиям.

3.3.3. Эпоксидные смолы

3.3.3.1. Общие свойства

Эпоксидные смолы отверждаются без выделения побочных продуктов и поэтому изделия из них имеют минимальную среди полимеров усадку — 0,2...0,5% и внутренние напряжения, смолы имеют высокие диэлектрические, прочностные характеристики и хорошие адгезионные свойства. Для сравнения: усадка полиэфирмалеинатов достигает 15%, полиэфирных смол (в зависимости от вида отвердителя) — от 7 до 15%, для фенолоформальдегидной композиции — от 1% и выше, полиимидов — 17%.

Уникально малая усадка и хорошие физико-механические свойства эпоксидных смол предопределили массовое их применение в электроизоляционных конструкциях, в том числе в производстве фольгированных диэлектриков для печатных плат.

Эпоксидные смолы — олигомеры или мономеры, содержащие в молекуле не менее двух эпоксидных групп и способные превращаться в полимеры пространственного строения.

Эпоксидные смолы получают чаще всего двумя способами:

- 1) взаимодействием эпихлоргидрина в присутствии щелочей с двух- или многоатомными фенолами, многоатомными спиртами, дикарбоновыми кислотами, ароматическими диаминами и другими соединениями, содержащими подвижные атомы водорода;
- 2) прямым эпоксидированием ненасыщенных соединений надкислотами (надуксусной, надбензойной, мононафталиевой).

Первым способом получают диэпоксидные олигомеры на основе дифенилолпропана, получившие название диановых, галогеносодержащие смолы для негорючих материалов, алифатические полимеры.

Вторым — циклоалифатические моно-, ди- и полиэпоксидные соединения.

Механизм отверждения эпоксидных смол заключается во взаимодействии их функциональных групп (эпоксидных и гидроксильных) с реакционноспособными группами отвердителя или между собой.

В качестве отвердителя применяют:

- а) продукты щелочного характера: различные ди- и полифункциональные алифатические и ароматические амины, низкомолекулярные полиамиды, допускающие отверждение при комнатной температуре;
- б) продукты кислого характера: ангидриды ди- и поликарбоновых кислот Малениновый, фталиевый и др. ангидриды). Тогда отверждение происходит при нагреве (120...200°C) в течение нескольких часов.

Тип отвердителя и его количество оказывают существенное влияние на условия отверждения и на электрические, физико-механические прочностные характеристики отвержденных эпоксидных смол. Очень важно соблюсти пропорцию между количествами эпоксидных групп в смоле и реакционных групп в отвердителе. Избыток реакционноспособных групп приводит к образованию большого числа сшивок, т. е. к переотверждению смолы, а возникающие при этом внутренние напряжения могут вызвать ее растрескивание. С другой стороны, слишком редкая пространственная сетка отвержденной смолы обуславливает низкие эксплуатационные свойства пластика: химическую стойкость, влагостойкость и др.

При любом виде отверждения полнота реакции полимеризации — процесс асимптотический во времени. Чтобы достичь полимеризации до твердого продукта нужны часы, но чтобы прошла полная полимеризация, нужны высокая температура (120...180°C) и время до нескольких суток. Производители фольгированных материалов не имеют такого времени для выпуска рентабельной продукции, поэтому в производстве печатных плат этот недостаток материала восполняют дополнительной термообработкой, которую условно называют термостабилизацией.

3.3.3.2. Диановые (дифункциональные) эпоксидные смолы

На рис. 3.8 показана схема реакции соединения эпихлоргидрина и бисфенола А с образованием дифункционального продукта — диановой смолы. Это наиболее распространенное связующее для стеклоэпоксидных фольгированных диэлектриков. Молекулярный вес эпоксидного полимера зависит от количества повторяющихся групп, показанных в центре молекулы. Название «дифункциональная эпоксидная смола» происходит от наличия двух функциональных групп.

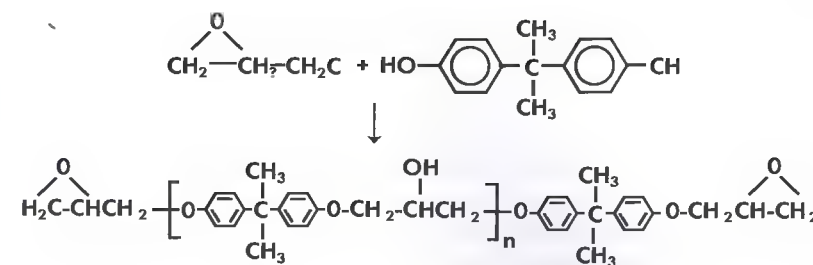


Рис. 3.8. Реакция образования диановой эпоксидной смолы

Диановые эпоксидные смолы поддаются галогенизации, в частности бромом, что используют для придания ей огнестойкости (рис. 3.9).

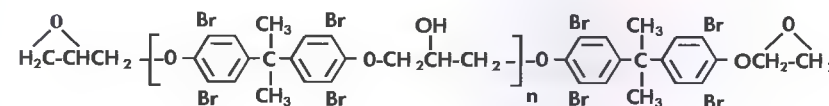


Рис. 3.9. Бромированная эпоксидная смола

Температуры стеклования диановых эпоксидных смол имеют широкий диапазон, но типично для них иметь T_g порядка 120°C. Поэтому они используются в простых малоответственных конструкциях, таких как простые двусторонние платы. В ряде случаев их подмешивают к высококачественным смолам для удешевления продукта.

3.3.3.3. Тетра- и многофункциональные эпоксидные смолы

Многофункциональность эпоксидных смол создает пространственную структуру сшивки молекул, в результате чего повышается прочность и нагревостойкость смол, повышается температура стеклования T_g . Промышленное производство многофункциональных эпоксидных смол допускает возможность получения различных смесей с различной функциональностью: ди-, тетра- и многофункциональных (рис. 3.10 и 3.11). Поэтому стандартно для эпоксидных смол иметь T_g в одном из нескольких диапазонов: 125...145°C, 150...165°C, 170...185°C.

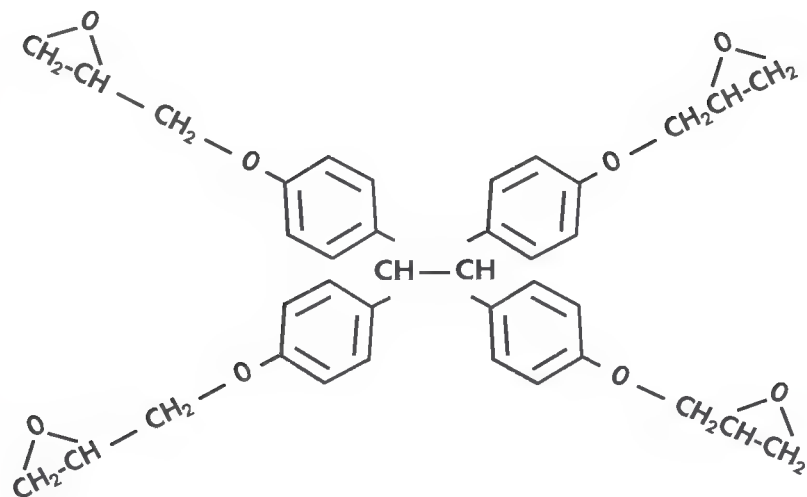


Рис. 3.10. Тетрафункциональная эпоксидная смола

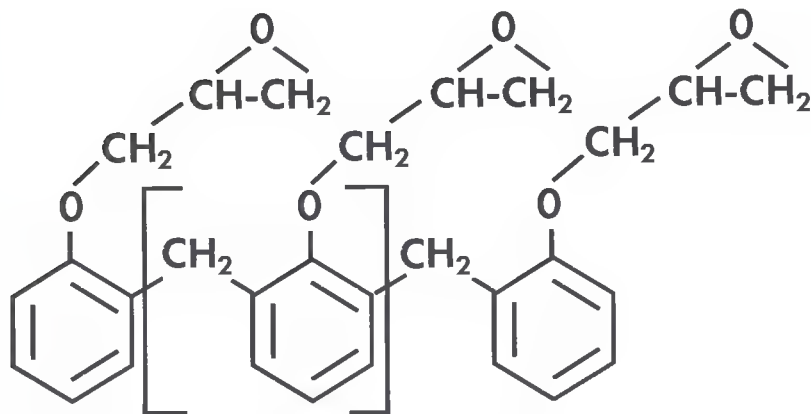


Рис. 3.11. Многофункциональная эпоксидная смола

Значение T_g сказывается на цене продукта. Кроме того, с увеличением T_g увеличивается цикл прессования и уменьшается производительность сверления. Поставщики материалов, в частности фирма Isola, в своих сертификатах предлагают режимы сверления для каждого сорта материала. Высокая цена на связующее с высоким T_g , увеличение производственных издержек при изготовлении фольгированных пластиков и печатных плат из материалов с высоким T_g ограничивает их использование. Это заставляет производителей фольгированных материалов для их удешевления разбавлять многофункциональные смолы дифункциональными и тем самым ухудшать их качество, но снижать стоимость.

3.3.4. Другие связующие

3.3.4.1. Эпоксидные композиции

Кроме смешения продуктов с разной функциональностью, ухудшающего их качество, эпоксидные смолы приобретают хорошие свойства диэлектрика при сополимеризации с такими смолами как феноленоксид с получением эпоксифеноленоксида (PPO — эпоху-polyphenylene oxide) и блок-сополимеризацией эпоксидного олигомера с цианатным полиэфиром с образованием полицианатэфирэпоксида (ECE — эпоху-сyanate ester). В блок-сополимере цианатный эфир играет роль отвердителя и пластификатора одновременно. Полиэфирэпоксида обладают высокой эластичностью, хорошими электрическими характеристиками на высоких частотах, высокой цементирующей способностью, высокой теплостойкостью, характеризующейся возможностью длительной работы при температуре 155°C . Однако в производстве печатных плат использование этих материалов может потребовать особое внимание к процессам очистки и подготовки поверхности отверстий под металлизацию.

3.3.4.2. Бисмалеимид Триазин (BT — Bismaleimide Triazine)

Обычно эпоксидные смолы добавляют к бисмалеимиду для улучшения его свойств. Эта смесь имеет T_g порядка 180°C и обладает хорошими электрическими и термическими свойствами, хорошей устойчивостью к химическим средам. Композиция BT/эпоху обычно используется в подложках под BGA-компоненты и для изготовления МПП по высоким проектным нормам.

3.3.4.3. Цианатный полиэфир

Системы цианатных полиэфиров отличаются очень высоким значением температуры стеклования — порядка 250°C. Хорошие термические свойства цианатных полиэфиров сочетаются с очень хорошими электрическими характеристиками, дающие им преимущества в изготовлении плат для высокочастотных изделий и для толстых многослойных панелей. Однако цианатные полиэфиры имеют высокие цены и требуют специальных процессов изготовления печатных плат, поэтому их использование связано с заметным удорожанием печатных плат.

3.3.4.4. Полиимиды

Полиимиды — полимеры, обычно получаемые в результате взаимодействия диангидридов тетракарбоновых кислот с ароматическими диаминами в полярных растворителях. Вначале образуются полиамидокислоты (ПАК), а при их последующей дегидратации — полиимиды.

ПАК растворимы в диметилформамиде, диметилацетамиде, N-метил-2-пирролидоне. Растворы ПАК используются в виде лаков. При термической обработке пленки ПАК образуется полиимид.

Полиимиды относятся к числу наиболее нагревостойких органических полимеров. При 500 °C полиимидная пленка вдвое прочнее, чем пленка из полиэтилена при 20°C.

Деструкция полиимидов протекает лишь при температурах выше 400°C. Основными продуктами деструкции являются CO₂ и CO. Пленка не плавится и не размягчается до 800°C.

Наряду с высокой нагревостойкостью полиимиды обладают исключительной морозостойкостью: при криогенных температурах, вплоть до -269°C, их механические свойства практически не меняются. Полиимиды характеризуются также хорошей стойкостью к органическим растворителям, маслам и разбавленным кислотам, но недостаточной к щелочам и перегретому пару, под действием которых они гидролизуются. Вода в обычных условиях на полиимиды не действует: даже при кипячении в воде полиимидные пленки месяцами сохраняют гибкость.

Высокомолекулярные линейные полиимиды широко используются в электроизоляционной технике, а ПАК-лаки — для производства эмалированных проводов и фольгированных пленок.

Для получения относительно толстых фольгированных материалов используются термореактивные полиимиды на основе ароматических диаминов и ангидридов ненасыщенных дикарбоновых кислот — малеиновой и эндометилентетрагидрофталевой. Термореактивные полиимиды заметно уступают по термостойкости обычным полиимидам, но значительно дешевле и технологичнее их. Термореактивные полиимиды намного легче перерабатываются, не требуют использования дефицитных и токсичных растворителей, имеют более широкую область применения особенно там, где требуется высокая температура стеклования. Для чистых полиимидов она близка к 260°C, для технических — к 220°C.

3.3.4.5. Полибензимидазолы и полибензоксазолы

Это полимеры на основе производных ароматических дикарбоновых кислот и ароматических тетрааминов или диоксидаминов. Отличительными свойствами этих полимеров являются высокая нагревостойкость (до 300°C на воздухе), отличная клеящая способность, высокие электрические характеристики. Это определило область их применения: электроизоляционные клеи и связующее слоистых пластиков, в том числе, для фольгированных диэлектриков.

3.3.4.6. Полисульфоны

Наиболее типичным из полисульфонов является полимер, получаемый поликонденсацией диоксифенилпропана и диоксифенилсульфона. Этот полимер имеет повышенную, стойкость к окислению и нагревостойкость. Температура стеклования полисульфонов порядка 180...200°C.

Полисульфон перерабатывается методом литья под давлением и экструзией. Практическое применение он нашел в виде волокон и пленок, в том числе фольгированных.

3.3.4.7. Сложные полиэфиры

Сложные полиэфиры — гетероцепные полимеры, синтезируемые поликонденсацией многоосновных кислот и многоатомных спиртов. Наиболее известен из-за широкого применения полиэтилентерефталат (ПЭТФ) — сложный эфир, получаемый переэтификацией диметилтерефталата этиленгликолем в присутствии катализатора

с последующей поликонденсацией образующегося бис-(β -оксипропил)-терефталата. Различия продуктов из ПЭТФ определяются его молекулярным весом и целевыми добавками, в основном стабилизаторами, замедляющими фото- и термодеструкцию. Товарный ПЭТФ известен под названиями: лавсан (аббревиатура из слов «лаборатория высокомолекулярных соединений»), майлар, дакрон (США), терилен (Англия). Отечественный ПЭТФ имеет молекулярный вес $(50...80) \cdot 10^3$ — для производства пленок, $(100...150) \cdot 10^3$ — для производства волокон. Наиболее высокомолекулярные ПЭТФ выпускает японская фирма «Мицубиси» (до $2 \cdot 10^6$), но их растворы имеют значительно большую вязкость, поэтому труднее перерабатываются и дороже.

ПЭТФ широко используется в изготовлении тканей для композиционных материалов, в том числе для диэлектрических оснований дешевых фольгированных материалов. Он гораздо легче в переработке, чем стеклоткани, но недостаточная нагревостойкость ограничивает его применение в изготовлении плат для массовой (большей частью, одноразовой) продукции.

Еще один сложный полиэфир — поликарбонат, известный как лексан (США), макролон (Германия) — сложные полиэфиры угольной кислоты. Отечественный аналог под названием дифлон синтезируют из дифенилолпропана и фосгена.

Сложные полиэфиры (в частности, поликарбонаты) активно используют в качестве подложки СВЧ-плат.

3.3.4.8. Ненасыщенные олигоэфиры (полиэфиры)

Наиболее распространенным ненасыщенным полиэфиром (НП) является продукт поликонденсации гликолей с малеиновой кислотой или ангидридом или фумаровой кислотой. Большая часть НП содержит стирол в качестве активного растворителя, с которым они сополимеризуются в процессе отверждения. Для отверждения используют всевозможные иницирующие системы из перекиси бензоила, метилэтилкетона, гидроперекиси изопропилбензола и др.

Полиэфирмалеинаты используют в качестве связующего для стеклопластиков. Длительная рабочая температура их не превышает 130°C . Для повышения нагревостойкости и улучшения электроизоляционных свойств их модифицируют соединениями, содержащими имидные или изоциануратные группы. Тогда их нагревостойкость характеризуется длительной работой при $150...170^\circ\text{C}$.

3.3.4.9. Простые полиэфиры

Типичные простые полиэфиры представлены полиформальдегидом (например, делрин фирмы Дюпон, США), пентоном, аллилполифениловым эфиром (APPE — Allylated Polyphenylene Ether), полифениленоксидом, полиметиленидифенилоксидом (дорил фирмы Вестингаус, США). Последние используют в качестве связующих для нагревостойких (190°C) слоистых пластиков на основе асбестовой и стеклянной тканей.

3.3.4.10. Политетрафторэтилен

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) известен по фирменным названиям: фторопласт-4 (Россия), тефлон (США), сорефлон (Франция), полифлон (Япония), альгофлон (Италия), хостафлон (Германия), флюон (Англия). Это линейный термопластичный кристаллический полимер белого цвета. Получают его суспензионной или эмульсионной полимеризацией тетрафторэтилена в присутствии инициаторов. При полимеризации образуется смесь из продуктов с различной степенью полимеризации. Для твердых продуктов используется ПТФЭ с молекулярным весом от ста тысяч до десяти миллионов. Кристаллическая форма структуры ПТФЭ при 327°C переходит в аморфную: прозрачную и эластичную.

Из всех известных материалов ПТФЭ наиболее химически стоек. Он не горит, при температурах до 260°C не растворяется ни в одном растворителе, на него не действуют кислоты и щелочи, сильные окислители и другие агрессивные вещества. ПТФЭ не выдерживает лишь воздействия расплавленных щелочных металлов, трехфтористого хлора, газообразного фтора при 150°C или при повышенном давлении, набухает в перфторкеросине при температурах около 300°C . Деструкция со значительным выделением токсичных газообразных продуктов начинается при температуре 415°C .

Физиологически ПТФЭ совершенно безвреден. Поэтому его успешно используют для жаропрочной облицовки кухонной посуды.

ПТФЭ обладает исключительно высокими электроизоляционными свойствами. Его диэлектрическая проницаемость самая низкая среди твердых материалов — $1,8...1,9$ и не меняется во всем доступном диапазоне частот, вплоть до 10^{10} Гц.

ПТФЭ свойственна ползучесть — деформация под нагрузкой. Для ее уменьшения в него вводят наполнители: стекловолокно, дисульфид молибдена, кварцевую муку и др.

ПТФЭ нельзя перерабатывать обычными методами из-за очень высокой вязкости расплава. ПТФЭ имеет плохую адгезию к различным материалам, поэтому перед приклеиванием его поверхность подвергают особой обработке (например, химическое травление, обработка в тлеющем разряде).

3.3.4.11. Фенолоальдегидные смолы

Как следует из названия это продукты поликонденсации фенолов с альдегидами. Наиболее широкое применение нашли фенолоформальдегидные смолы. Другие альдегиды, нашедший промышленное применение — фурфурол. В сочетании с электротехническими бумагами (кабельной, конденсаторной) фенолоформальдегидные смолы образуют самый дешевый листовый пластик коричневого цвета — гетинакс.

3.4. Армирующие наполнители композиционных материалов

В качестве диэлектрических оснований базовых материалов для печатных плат большей частью используют слоистые пластики, армированные волокнистыми материалами.

В производстве фольгированных гетинаксов применяют бумагу из целлюлозы, получаемую в отечественном производстве из лиственных и хвойных пород деревьев, за рубежом — из рисовой соломки. Волокна целлюлозы обладают высокими диэлектрическими свойствами, однако склонность к поглощению влаги сильно ухудшает эти свойства.

Для изготовления фольгированных стеклотекстолитов используют в качестве наполнителя стеклоткань полотняного плетения. Использование стекловолокнистых наполнителей обусловлено, прежде всего, размерной устойчивостью стеклянного волокна в широком диапазоне температур, а также большой механической прочностью и нагревостойкостью.

Для особых случаев используют кварцевую ткань с полиимидным связующим. Этот экзотический материал, кроме хорошей

нагревостойкости, обладает уникально низкой для композиционных материалов диэлектрической проницаемостью, что дает ему большие преимущества для применения в СВЧ-устройствах.

Производство бумаг и тканей из синтетических и природных волокон не имеют каких-либо особенностей применительно к электротехническим целям. Единственное требование к ним — чистота продукта, отказ от использования декоративных добавок, ухудшающих электроизоляционные свойства композиционных диэлектриков. Поэтому в дальнейшем больше внимания будет уделено стеклянным армирующим материалам.

3.4.1. Силикатные наполнители

3.4.1.1. Составы электротехнических стекол

Стеклообразное состояние является разновидностью аморфного. Стеклами называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава. Поскольку при охлаждении вязкость возрастает непрерывно переход расплава в твердое (стеклообразное) состояние происходит не при строго определенной температуре (как это характерно для кристаллов), а в переходной температурной области.

Компоненты стекол по своей роли в процессе стеклообразования делятся на три группы:

- оксиды-стеклообразователи: SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 и др.;
- оксиды-модификаторы: CaO , BaO , Na_2O , K_2O и др.;
- промежуточные оксиды, сами не образующие стекол, но способные принимать участие в образовании сетки многокомпонентных стекол: Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , MgO , ZnO и др.

Электротехнические стекла отличаются очень малым содержанием щелочных металлов, так как они ухудшают электроизоляционные свойства стекол (это так называемые бесщелочные стекла).

Процесс формирования непрерывного стеклянного волокна предъявляет к стеклу ряд требований, которым удовлетворяют стекла, относящиеся к разряду алюмосиликатных, боросиликатных и алюмоборосиликатных (табл. 3.1). Отдельно стоит чистый кварц, который отличается лучшими электрическими свойствами ($\epsilon_r = 3,7...3,8$), но сложен в переработке из-за высокой температуры плавления.

Таблица 3.1. Составы стекол для электротехнических стеклотканей

Компоненты	E-glass	S-glass	D-glass	Кварц
Двуокись кремния	52-56%	64-66%	72-75%	99.97%
Окись кальция	16-25%	0-0.3%	0-1%	
Оксид алюминия	12-16%	24-26%	0-1%	
Оксид бора	5-10%		21-24%	
Окись калия и натрия	0-2%	0-0.3%	0-4%	
Окись магния	0-5%	9-11%		
Окись железа	0.05-0.4%	0-0.3%	0.3%	
Окись титана	0-0.8%			
Фториды	0-1.0%			

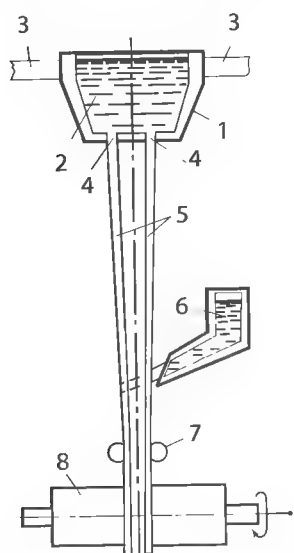


Рис. 3.12. Схема изготовления стеклянных нитей: 1 — стеклоплавильный сосуд; 2 — расплав стекла; 3 — токоподводы; 4 — фильеры; 5 — вытягивающиеся стеклянные нити; 6 — замасливатель; 7 — правила (раскладчик); 8 — быстро вращающийся барабан.

3.4.1.2. Стеклянные волокна

Стекло в толстом слое представляет собой хрупкий материал, но тонкие стеклянные изделия обладают повышенной гибкостью. Весьма тонкие (диаметром 4—7 мкм) стеклянные волокна имеют уже настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться приемами текстильной технологии. Большая гибкость и прочность стекловолокна объясняются ориентацией молекул поверхностного слоя стекла, имеющей место при вытягивании стекловолокна из расплавленной стекломассы и его быстром охлаждении.

По одному из способов стекловолокно производится следующим образом. Стекло расплавляют в изготовленной из тугоплавкого платинового сплава «лодочке» (рис.3.12), которая

накаливается пропусканием через нее электрического тока. На дне лодочки имеются отверстия (фильеры) диаметром около 1 мм. Расплавленная стеклянная масса под действием собственного веса медленно вытекает через отверстия в виде нитей, диаметр которых примерно равен диаметру отверстий. Выходящая из фильеры нить наматывается на быстро вращающийся барабан и увлекается им с очень большой скоростью (около 2000 м/мин), вследствие чего еще не успевающая полностью охладиться стеклянная нить вытягивается в тонкое волокно. Отдельные волокна, числом до ста — по числу фильер в лодочке (на рис.3.11 для простоты показаны только две нити), соединяются друг с другом при помощи «замасливателя» в одну пряжу. Благодаря замасливателю нити не свариваются и при дальнейшей перемотке с барабана не происходит спутывания волокон из различных прядей.

В качестве замасливателя для непрерывного стеклянного волокна применяются быстрозастывающие эмульсии на основе парафина, которые потом приходится выжигать, иначе они будут мешать пропитке связующим и снижать прочность стеклопластика. Для изготовления стеклопластиков на жпоксидных и фенольных смолах, используются кремнийорганические и другие замасливатели, не требующие выжигания.

3.4.1.3. Стеклянные ткани

Из стеклянных нитей получают крученую стеклянную пряжу, скрученную из отдельных волокон. Из пряжи ткют стеклянные ткани с различным видом плетения: саржевое, полотняное, сатиновое. Ткани и ленты из стеклянного волокна, применяемые для электрической изоляции, обычно имеют толщину 0,010...0,28 мм, массу 1 м² от 0,025 до 5 кг, соотношению прочности по утку и основе от 1:1 до 1:10, плотностью переплетения (количества нитей на единицу площади ткани) по утку и основе. В табл. 3.2 приведены характеристики стеклянных тканей, а на рис. 3.12 показан внешний вид некоторых из них.

Преимуществами стеклянной волокнистой изоляции по сравнению с органическими волокнами являются: высокая теплоустойчивость, а также значительная механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства.

Таблица 3.2. Типы стеклотканей, используемых в производстве фольгированных материалов.

Тип	Толщина в дюймах	Плотность плетения		Масса		
		в милли- метрах	(нитей/ дюйм)	(нитей/см)	г/м ²	(oz/yd. ²)
106	0,0014	0,036	56x56	22x22	24,8	0,73
1080	0,0023	0,058	60x47	24x18	48,1	1,42
1500	0,0052	0,132	49x42	19x16	167,8	4,95
1652	0,0045	0,114	52x52	20x20	141,7	4,18
2113	0,0029	0,074	60x56	24x22	78,3	2,31
2116	0,0038	0,096	60x58	24x23	109,2	3,22
2165	0,0040	0,101	60x52	24x20	120,3	3,55
2313	0,0032	0,081	60x64	24x25	80,7	2,38
3070	0,0031	0,079	70x70	28x28	92,9	2,74
3313	0,0033	0,084	60x62	24x24	81,4	2,40
7628	0,0068	0,174	44x32	17x12	203,4	6,0
7629	0,0070	0,178	44x34	17x13	211,9	6,25
7635	0,0080	0,203	44x29	17x11	233,9	6,90

Толщину стеклоткани приходится учитывать, когда к плате предъявляются требования по волновому сопротивлению полосковых линий связи и при наличии в конструкции платы печатного разъема. Кроме того, из рисунка 3.13 можно видеть, что плотность переплетения нитей и плотность скрутки пряжи сказывается на пропитке ткани связующим. Можно также утверждать, что чем рыхлее переплетение, тем меньше остаточных напряжений в диэлектрическом основании, которые потом реализуют себя в усадке слоев после травления.

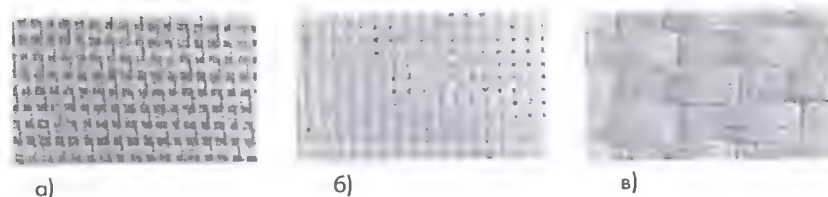


Рис. 3.13. Виды тканей (в соответствии с табл. 3.2): а) 1080, б) 2116, в) 7628

3.4.2. Другие наполнители

Фольгированные материалы на основе стеклотканей широко применяются в производстве печатных плат наряду с другими более дешевыми наполнителями, которые используются или сами по себе или в комбинации со стеклянными тканями.

3.4.2.1. Стеклянный шпон

Среди нетканых материалов из стекла находит применение стеклянная бумага или шпон, представляющие собой тонкий или толстый слой хаотически расположенных стеклянных штапельных волокон, скрепленных между собой связующим.

Стеклянный шпон используется как наполнитель в производстве относительно дешевого материала типа СЕМ-3, который применяют для печатных плат домашних компьютеров, автоэлектроники, бытовой электроники.

3.4.2.2. Арамидные волокна

Арамид — ароматический полиамид — аморфный полимер линейного строения, обладающий высокой прочностью в нитях, лентах и пленках. Его синтезируют на основе *m*-фенилендиамин и производных изофталевой и терефталевой кислот. Отечественное название ароматических полиамидов — фенилон. Для арамида и фенилона характерны высокие температуры размягчения (до 430°C), достаточно высокая (до 220°C) температура длительной эксплуатации, повышенная радиационная и химическая стойкость, низкая плотность, отрицательный коэффициент линейного расширения в аксиальном направлении (вдоль волокон). В смеси с другими смолами композиция может получить нулевой коэффициент линейного расширения по осям X-Y. Уникальные свойства арамидных волокон позволяют использовать их в композиционных материалах подложек для монокристаллических модулей, многоуровневых печатных платах с глухими отверстиями, которые легко формируются в арамиде с помощью плазмы или лазера.

3.4.2.3. Бумага

Целлюлозная бумага также может быть использована как армирующий материал. Она может быть усилена стеклянными тканями, может использоваться самостоятельно. Но главное ее назначение — удешевить базовый материал, что особенно важно в производстве массовой

продукции: телевизоров, калькуляторов, радиоприемников, электронных игрушек и т.п. Бумага из очищенной целлюлозы используется в производстве FR-2, FR-3 и в комбинации со стеклотканью — в СЕМ-1.

3.4.3. Простые наполнители

Здесь имеется ввиду тонко измельченный материал, который добавляется в связующее для изменения его свойств. В ряду таких наполнителей, большей частью, неорганические материалы, начиная от каолина до стеклянных сфер. Незачем говорить о рядовых наполнителях. Интерес проявляется к необычному их использованию. Например, каолиновая пудра в смеси с коллоидным палладием, введенная в объем диэлектрического основания, служит катализатором химической металлизации применительно к аддитивным процессам изготовления плат. Стеклянные микросферы уменьшают диэлектрическую проницаемость и потери в диэлектрических подложках. Другие наполнители уменьшают коэффициент термического расширения и, тем самым, улучшают надежность плат. Использование наполнителей, зачастую, улучшает обрабатываемость плат.

3.5. Технология изготовления материалов диэлектрического основания

Общая схема изготовления фольгированных материалов показана на рис. 3.14.

Качество фольгированных интервалов определяют два основных процесса: пропитка и прессование. Пропитку наполнителя раствором связующего можно рассматривать, как вытеснение воздуха из пор и капилляров наполнителя и замену его связующим.

При пропитке бумаги раствор связующего не только проникает в поры между волокнами целлюлозы, но пропитывает сами волокна. В случае недостаточной пропитки отдельных волокон этот дефект может быть исправлен при прессовании.

Для изготовления высококачественных фольгированных стеклотекстолитов полное смачивание стеклянного волокна связующим и вытеснение воздуха — неперенное условие процесса пропитки.

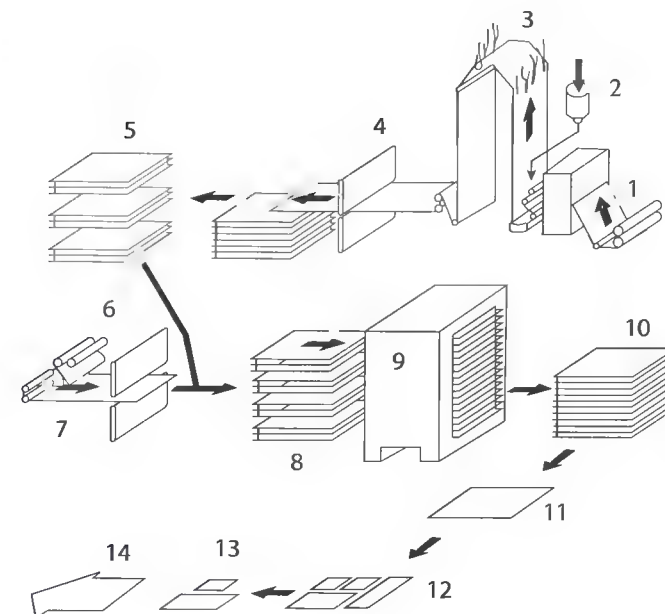


Рис.3.14. Схема изготовления фольгированных материалов: 1 — рулон ткани, 2 — эпоксидная смола, 3 — сушка в вертикальной печи, 4 — разрезание препрега по длине, 5 — укладка в пакеты, 6 — медная фольга, 7 — разрезание по длине, 8 — пакеты препрега и фольги, 9 — пресс, 10 — выборочный контроль, 11 — обрезка обоя, 12 — раскрой в размер, 13 — контроль, 14 — отгрузка

После пропитки наполнитель, подвергается сушке, при которой протекают два процесса: физический — испарение растворителя и химический — начальная стадия реакции конденсации и структурирование олигомера. Так что в конце сушки связующее переходит в полутвержденное состояние (стадия В).

В таком состоянии пропитанный наполнитель используется для изготовления фольгированных слоистых пластиков методом прессования. Для изготовления МПП, в которых отдельные печатные слои склеиваются в монолитный пакет слоев, наряду с тонкими фольгированными листами отвержденной стеклоткани поставляется

прокладочная стеклоткань, связующее в которой в исходном состоянии должно находиться на стадии В.

Пропитанный наполнитель характеризуется четырьмя основными показателями: содержанием связующего (наносом смолы), содержанием летучих, содержанием растворимой части связующего и текучестью. Методы определения этих параметров стандартизированы.



Рис. 3.15. Порядок укладки пакетов препрега с фольгой и прокладочных листов между плитами пресса: 1 — верхний прокладочный стальной лист, 2 — прокладочный материал, 3 — слой пропитанной связующим стеклоткани с фольгой, 4 — прокладочные листы, 5 — прокладочный материал, 6 — нижний прокладочный стальной лист, 7 — шток (поршень) гидравлического пресса.

Процесс прессования заключается в одновременном воздействии на материал высокого давления и температуры. На рис. 3.15. показан порядок укладки пакетов препрега с фольгой и прокладочных листов между плитами пресса. Под влиянием повышенной температуры смола, находящаяся в пропитанном наполнителе, расплавляется и под давлением более глубоко пропитывает листы наполнителя, склеивая их. Воздушная прослойка между листами фольги и слоями пропитанного наполнителя выжимается на

периферию пакета. Текучесть и вязкость расплавленной смолы, связанные со степенью конденсации, реакционной способностью и температурой, должны обеспечить возможность удаления воздушных включений, прежде чем расплавленная смола станет твердой. При низкой текучести смолы отдельные воздушные включения вдавливаются в поры наполнителя и остаются в нем. Слишком большая текучесть ведет к снижению количества смолы в материале. Для улучшения процесса выдавливания летучих и газовых фракций используют прессы с вакуумным отсосом.

Производство фольгированных диэлектриков отличается большой масштабностью. Прессы имеют до 32 просветов, ход поршня пресса может иметь несколько метров, чтобы выбрать зазоры во всех этажах пресса. Машина для сушки пропитанной ткани имеет высоту в несколько этажей, ткань многократно проходит мимо калориферов, чтобы успеть при движении с большой скоростью завершить переход связующего из стадии А в стадию В. Энергоемкость производства так велика, что приходится рядом строить автономную теплостанцию. Тогда весь обогрев плит пресса и сушильной камеры производится перегретым паром. Охлаждение плит пресса водой позволяет использовать возвратное тепло.

При изготовлении гетинакса в результате реакции конденсации фенолоальдегидных смол в материале остаются побочные продукты реакции (вода, формальдегид и т. д.), поскольку давление прессования превышает давление их паров. Аналогичное явление запрессовки влаги происходит в эпоксидных стеклопластиках, когда материал успел набрать влагу в процессе хранения в заделе.

Важным параметром смол является концентрация реакционноспособных групп (эпоксидных групп для эпоксидной смолы). Избыток реакционноспособных групп в смоле приводит к образованию большого числа сшивок, т. е. к переотверждению смолы, а возникающие при этом внутренние напряжения могут вызвать ее растрескивание. С другой стороны, слишком редкая пространственная сетка отвержденной смолы обуславливает низкие эксплуатационные свойства пластика (химическую стойкость, влагостойкость и др.)

При низком содержании смолы в наполнителе снижается прочность склеенных в единое целое листов, и может произойти расслоение диэлектрического основания и возрасти водопоглощение. Однако чрезмерное высокое содержание смолы повышает хрупкость материала.

Расслоение диэлектрика может быть связано с пересушкой пропитанного наполнителя, т. е. с низким содержанием летучих фракций или с чрезмерным отверждением смолы во время сушки в пропиточной машине, о чем свидетельствуют низкая текучесть и низкое содержание растворимой части смолы. Высокое содержание летучих фракций может привести к вздутиям диэлектрика.

Быстрый нагрев материала в процессе прессования или слишком высокая начальная температура могут привести к образованию матовых пятен (обнаруживаемых после стравливания фольги), т. е. к недопрессовке: в результате быстрого отверждения поверхностной пленки спрессовываемого пакета в ней остаются мельчайшие воздушные включения, которые и создают «матовость» в местах их скопления. Это явление усугубляется неравномерным прогревом плит пресса. Для предотвращения недопрессовки процесс растекания смолы должен предшествовать процессу ее отверждения.

При выборе оптимального давления прессования следует иметь в виду, что чем выше удельное давление прессования, тем выше монолитность пластика. Однако при высоком давлении растекаемость смолы повышается, и она может быть выдавлена сверх нормы. Давление следует увеличивать постепенно (ступенчато). Иначе в результате внутреннего давления, создаваемого остатками летучих продуктов или побочными продуктами, выделяющимися при отверждении смолы, в материале могут появиться вздутия и расслоения.

Продолжительность прессования связывают главным образом с толщиной прессуемого материала. Несмотря на то, что увеличение толщины загружаемого материала повышает производительность оборудования, следует иметь в виду, что при этом может понизиться качество диэлектрика в связи с ухудшением температурных условий прессования. Если продолжительность прессования недостаточна, то готовый фольгированный диэлектрик оказывается склонным к короблению, у него проявляются недостаточная жесткость и пониженная влагостойкость. Чрезмерная длительность прогрева также нежелательна и может привести к разложению материала и снижению его физико-механических свойств. Обычно время выдержки определяют в зависимости от толщины прессуемого материала в одном этапе пресса из расчета 4...6 мин на 1 мм толщины материала.

3.6. Основные типы фольгированных материалов

3.6.1. Сортамент композиционных материалов для диэлектрических материалов

Перечень выпускаемых промышленностью материалов чрезвычайно широк. Практически можно найти материал под любые нужды проектирования печатных плат. Если же рассчитывать на стандартную продукцию производства электроники, то можно ориентироваться на сортамент материалов, показанный в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Сортамент фольгированных материалов по стандарту NEMA

Обозначение	Связующее (смола)	Армирующий материал (наполнитель)	Огнестойкость
XXXPC	Фенолоальдегид	Бумага	Нет
FR-2	Фенолоальдегид	Бумага	Да
FR-3	Эпоксидная смола	Бумага	Да
FR-4	Эпоксидная смола	Стеклоткань	Да
FR-5	Эпоксидная смола	Стеклоткань	Да
FR-6	Полиэфир	Стеклошпон	Да
G-10	Эпоксидная смола	Стеклоткань	Нет
CEM-1	Эпоксидная смола	Бумага + стеклоткань	Да
CEM-2	Эпоксидная смола	Бумага + стеклоткань	Нет
CEM-3	Эпоксидная смола	Стеклоткань + стекlobумага	Да
CEM-4	Эпоксидная смола	Стеклоткань + стекlobумага	Нет
CRM-5	Полиэфир	Стеклоткань + стекlobумага	Да
CRM-6	Полиэфир	Стеклоткань + стекlobумага	Нет
CRM-7	Полиэфир	Стеклобумага + стеклянная вуаль	Да
CRM-8	Полиэфир	Стеклобумага + стеклянная вуаль	Нет

Стандарт IPC-4101 на диэлектрические подложки дает более широкий сортамент (табл. 3.4)

Таблица 3.4. Обозначение сортамента фольгированных материалов

Обозначение	Армирующий наполнитель	Связующее	Традиционное обозначение	Температура стеклования, °C
00	Целлюлозная бумага	Фенолоальдегид	XPC	Не регламентировано
01	Целлюлозная бумага	Модифицированный фенолоальдегид	XXXPC	Не регламентировано
02	Целлюлозная бумага	Фенолоальдегид, огнестойкий	FR-1	Не регламентировано
03	Целлюлозная бумага	Модифицированный фенолальдегид, огнестойкий	FR-2	Не регламентировано
04	Целлюлозная бумага	Модифицированный эпоксид, огнестойкий	FR-3	Не регламентировано
10	Целлюлозная бумага по центру + стеклоткань снаружи	Модифицированный эпоксид, огнестойкий	CEM-1	Не регламентировано
11	Стекланный войлок по центру + стеклоткань снаружи	Полиэфир огнестойкий	CRM-5	>80°C
12	Нетканное стекло по центру + стеклоткань снаружи	Эпоксидная смола, огнестойкая	CEM-3	Не регламентировано
20	Стеклоткань плотная	Эпоксидная смола, не огнестойкая	G-7	>100°C
21	Стеклоткань плотная	Эпоксидная смола, не огнестойкая	G-10	>110°C
22	Стеклоткань плотная	Эпоксидная смола нагревостойкая, не огнестойкая	G-11	135-175°C
23	Стеклоткань плотная	Эпоксидная смола нагревостойкая, огнестойкая	FR-4	135-175°C
24	Стеклоткань плотная	Обычная эпоксидная смола модифицированная или не модифицированная, огнестойкая	FR-5	150-200°C
25	Стеклоткань	Эпоксидная смола + PPO, огнестойкая	FR-4	150-200°C

Обозначение	Армирующий наполнитель	Связующее	Традиционное обозначение	Температура стеклования, °C
26	Стеклоткань	Обычная эпоксидная смола модифицированная или не модифицированная, огнестойкая	FR-4	170-220°C
27	Стеклоткань непрямого перекрестного плетения	Обычная эпоксидная смола, огнестойкая	Без названия	>110°C
30	Стеклоткань	Триазин и/или бисмалеимид, модифицированные эпоксидной смолой, огнестойкие	GFT	170-220°C
40	Стеклоткань	Полиимид	GI/GIN	>200°C
41	Стеклоткань	Полиимид	GI/GIL	>250°C
42	Стеклоткань	Полиимид	GI/GIJ	200-250°C
50	Арамидная ткань полотняная	Модифицированная эпоксидная смола	AF	135-190°C
53	Нетканый арамид	Полиимид	BI	>220°C
54	Арамид непрямого перекрестного плетения	Цианатный полиэфир	Нет обозначения	>230°C
55	Нетканый арамид	Модифицированная эпоксидная смола	BF	135-190°C
60	Кварцевая ткань полотняного плетения	Полиимид	QIL	>250°C
70	Стеклоткань	Цианатный полиэфир	27	>230°C
71	Стеклоткань	Цианатный полиэфир	GC	>230°C
80	Целлюлозная бумага по центру + стеклоткань снаружи	Модифицированная эпоксидная смола с введенным катализатором	CEM-1	Не регламентировано
81	Нетканное стекло по центру, стеклоткань снаружи	Эпоксидная смола с введенным катализатором	CEM-3	Не регламентировано
82	Стеклоткань	Эпоксидная смола с введенным катализатором, огнестойкая	FR-4	110°C

3.6.2. Распространенные типы фольгированных материалов

3.6.2.1. Гетинакс (ГФ)

Материал на основе электроизоляционной бумаги с пропиткой фенольной смолой. По ГОСТ 10316 обозначается как ГФ, по стандартам NEMA — ХРС, ХХХРС и ХХХР. Обычный цвет — коричневый. Нагревостойкость — не выше 90° С. Предназначен для работы в нормальных условиях влажности окружающей среды (относительная влажность 45...75 % при температуре 15...35° С). Огнестойкие варианты гетинакса обозначаются FR-1 и FR-2.

3.6.2.2. Эпоксидный гетинакс (FR-3)

выполняется на бумажной основе, пропитанной эпоксидной смолой (отечественной промышленностью не выпускается). По стандарту NEMA обозначается, как тип FR-3. Цвет светло-желтый или белый, полупрозрачен. Нагревостойкость 120...135° С. Штампуется без нагрева при толщинах до 1,5 мм.

3.6.2.3. Эпоксидный стеклотекстолит (СФ, G-10)

Этот материал имеет в качестве основы стеклоткань, связующее вещество — эпоксидная смола. В отечественном производстве обычно используют эпоксидно-фенолоформальдегидную смолу — эпоксидную смолу, отверждаемую смолой резального типа. Обозначается по ГОСТ 10316 как СФ, по стандарту NEMA — G-10. Стеклотекстолиты полупрозрачны и имеют зеленый (зарубежные) или светло-коричневый цвет. Нагревостойкость фольгированных стеклотекстолитов 135...150°С. Способны работать после пребывания в условиях повышенной влажности (относительная влажность до 98 % при температуре 40°С). Штампуется без нагрева.

3.6.2.4. Нагревостойкий эпоксидный стеклотекстолит (СФН)

Этот материал предназначен для изготовления печатных плат, допускающих работу при температуре до 180° С в течение суммарного или непрерывного времени до 100 ч, а также кратковременную ра-

боту при относительной влажности до 98 % при температуре не менее 40°. Обозначается по ГОСТ 10316 СФ-2Н-50, по стандартам NEMA — G-7, G-10, G-11. По внешнему виду материал может быть непрозрачным разных цветов или полупрозрачным коричневого или темно-зеленого цвета.

3.6.2.5. Нагревостойкие огнестойкие эпоксидные стеклотекстолиты (FR)

Это широкий класс нагревостойких материалов на бромированном огнестойком связующем на основе эпоксидных смол и их смесей с другими улучшающими качество компонентами. Многоликость стеклотекстолитов под маркой FR, а еще чаще, FR-4 должна настораживать потребителей, чтобы получить именно то, что ему нужно. Стандарты IPC, а теперь стандарты Международной электротехнической комиссии (МЭК), более подробно расшифровывают компонентное содержание и свойства материалов под маркой FR. В частности температура стеклования этих материалов находится в диапазоне 110...190°С. Обрабатываемость их также различна. Во всяком случае квалифицированные поставщики этих материалов сопровождают поставки рекомендациями по режимам сверления плат из этих материалов. Табл. 3.4. демонстрирует разнообразие материалов под маркой FR.

3.6.2.6. Полиэфирные текстолиты

Эти материалы представлены группами.

1. Дешевые материалы из простых полиэфиров изготавливают полностью на основе полиэфирной ткани и полиэфирного связующего.

2. Нагревостойкие материалы на основе ароматических полиэфиров — арамидов.

3. Нагревостойкие материалы на основе цианатных полиэфиров. Различные комбинации полиэфиров с другими нагревостойкими композициями, в том числе с полиимидами, создают большое разнообразие материалов, отличающихся ценой и качеством.

3.6.2.7. Полиимид и цианатный полиэфир, армированные нагревостойкими тканями

При уменьшении диаметра сквозных отверстий при сохранении толщины печатной платы возникают трудности в обеспечении

надежности металлизированных отверстий: развивающиеся при пайке напряжения из-за различного теплового расширения меди и диэлектрика приводят к разрыву металлизации отверстий. В таких конструкциях должны применяться диэлектрики, имеющие такой же ТКР, как и медь. К ним относятся полиимид и цианатный полиэфир. Но при полимеризации (отверждении) они значительно усаживаются, в большей мере, чем эпоксидные смолы, т.е. меняют свои линейные размеры после вытравливания рисунка из медной фольги. В то же время увеличение плотности межсоединений требует высокой размерной устойчивости материалов слоев для обеспечения совмещения элементов соединений в многослойных структурах МПП. Армирование тканями из кварца и стекла позволяет уменьшить усадочные явления и в какой-то мере обеспечить точность совмещения.

Но в последнее время полиимид активно используется в производстве многоуровневых печатных плат, в конструкциях которых армирующий элемент — печатная плата с жестким основанием, на которое наслаиваются полиимидные слои.

Сочетание низких диэлектрических проницаемостей полиимида и кварца позволяют использовать эту комбинацию для СВЧ-подложек. Кроме того, этот композиционный материал обладает большой нагревостойкостью и особенно близким к металлам значением коэффициента термического расширения. Диэлектрическая проницаемость алюмоборосиликатного стекла гораздо больше (порядка 9), чем у кварца (3,5), но по нагревостойкости и коэффициенту термического расширения полиимида, армированные стеклотканью, имеют значительные преимущества перед другими композитами.

3.6.2.8. Комбинации материалов

В табл. 3.4 можно увидеть всевозможные сочетания армирующих наполнителей. Этими комбинациями стараются уменьшить стоимость материалов и при этом сохранить их качество. Это не всегда удается, но следы этих попыток зафиксированы в соответствующих стандартах. Доступные источники информации не содержат примеры промышленного использования таких материалов.

3.6.2.9. Склеивающие материалы

Фольгированные материалы для МПП поставляются в комплекте со склеивающей стеклотканью, составляющей примерно 30...40 % массы всей партии материала. Время хранения склеивающей стеклоткани ограничено, так как связующее постепенно переходит в неплавкое состояние: из стадии В в стадию С. В исходном состоянии эти материалы являются полуфабрикатом, большая часть физико-механических свойств которого формируется в процессе изготовления МПП.

3.7. Свойства фольгированных материалов

Физико-механические характеристики фольгированных материалов определяют важные прочностные параметры печатных узлов, так как в большинстве случаев печатные платы служат не только для электрического соединения радиоэлементов, но и для их конструктивного крепления в составе печатного узла. При эксплуатации электронной аппаратуры печатные узлы могут подвергаться значительным механическим воздействиям, поэтому важно знать способности материалов к деформациям и прочность сцепления фольги с диэлектриком. Необходимо учитывать, что механические свойства фольгированных материалов существенно зависят от температуры и влажности. Поэтому при механических испытаниях важно, чтобы испытываемые образцы находились в определенных условиях температуры и влажности. Необходимо также учитывать, что фольгированные стеклотекстолиты являются анизотропными материалами, поэтому существенное значение имеет направление, в котором производится воздействующее испытание.

3.7.1. Физико-механические свойства

3.7.1.1. Подготовка образцов к испытаниям

Испытания, как правило, проводятся на образцах с частичным или полным удалением фольги. Рисунок на фольгированной поверхности наносится методом фотолитографии или другим методом, обеспечивающим необходимую точность. Травление

фольги производится струйным или другим эквивалентным методом с применением доступного всем водного раствора хлорного железа плотностью 1,3...1,4 г/см³. Время травления не должно превышать значений, указанных ниже:

Толщина фольги, мкм	18	35	50	70	105
Время травления, мин	4	7	10	15	20

Если после травления остаются частицы меди, образец не следует использовать для испытаний.

После травления удаляют средства, предохраняющие фольгу от травления, средством, не оказывающим воздействия на клеевой слой. Затем образцы промывают в проточной воде и подсушивают в термостате при температуре 70±2° С в течение 4 ч и выдерживают не менее 6 ч при температуре 20±5° С и относительной влажности 65±5 %.

3.7.1.2. Механическая прочность

Характеристики механической прочности материалов определяют на образцах с предварительно удаленной фольгой.

Механические свойства слоистых пластиков заметно отличаются по направлениям плетения: по утку и по основе. Для примера в табл. 3.5 приведены значения предела прочности на изгиб материалов толщиной 1,5 мм.

Таблица 3.5. Прочность оснований фольгированных диэлектриков на изгиб

Тип материала	Предел прочности на изгиб, МПа	
	По основе	По утку
XXXPC	8,44 × 10 ⁶	7,39
CEM-1	21,10	17,6
CEM-3	23,20	19,0
FR-1	8,44	7,04
FR-2	8,44	7,39
FR-3	14,1	11,3
FR-4	42,3	35,2
FR-5	42,3	35,2
Полиимид/стеклоткань	42,3	31,7
Цианатный полиэфир/стеклоткань	35,2	35,2

3.7.1.3. Релаксация (податливость)

Дополнительно к общепринятому перечню механических параметров фольгированные материалы характеризуются деформацией под нагрузкой. Этот параметр определяет способность жесткого пластика в сборке с другими элементами, прикрепленными болтами, заклепками или другими крепежными приспособлениями, сохранять постоянную силу сжатия, не обнаруживая текучести или ослабления прочности сборки. Деформация под нагрузкой (релаксация) определяется процентным изменением толщины под воздействием нагрузки 28 МПа (280 кгс/см²) при температуре 70° С в течение 24 ч:

	XXXPC	FR-1	FR-4	FR-5
Изменение толщины под нагрузкой (релаксация), %.....	1,7	1,5	0,2	0,1...0,2

3.7.1.4. Плотность

Плотность материала с фольгой и без фольги определяют гидростатическим методом: взвешиванием образца на воздухе и в воде. Образец произвольной формы и массой не менее 0,5 г взвешивают на аналитических весах с погрешностью до 0,002 г. Затем его окунают в этиловый спирт для улучшения смачивания поверхности водой. Образец подвешивают на проволоке диаметром 0,2 мм к коромыслу весов. Подставляют под образец стакан с водой на специальную подставку, которая не должна касаться чашки весов, погружают в воду подвешенный образец и, отметив уровень погружения проволоки, взвешивают. Образец снимают с проволоки. Затем взвешивают проволоку при том же уровне погружения. Вычисляют плотность образца i :

$$\gamma = \frac{g}{g - (b_1 - b_2)} \gamma_0, \text{ где } g - \text{вес образца на воздухе, г; } b_1 - \text{вес}$$

образца погруженной части проволоки в воде, г; b_2 - вес проволоки в воде, г; i_0 - плотность воды при температуре испытаний.

В табл. 3.6 приведены значения плотности некоторых материалов.

Таблица 3.6. Плотность связующего фольгированных материалов

Материал	Плотность, г/см ³
FR-4 – эпоксидная смола	1.79
FR-4 – эпоксидная смола с наполнителем	1.97
FR-4 – эпоксидная смола с высокой T _g	1.79
BT/эпоксидная смола	1.77
Эпоксидная смола с низкими потерями	1.77
Цианотный полиэфир	1.71
Полиимид	1.68
APPE	1.51

3.7.1.5. Водопоглощение, влагостойкость

Водопоглощение согласно ГОСТ 4650 определяют на образцах материала с удаленной фольгой. Образцы кондиционируют, взвешивают, погружают в дистиллированную воду с температурой $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ на 24 ч. После извлечения образцов из воды их насухо протирают фильтровальной бумагой и по истечении 1 ч снова взвешивают.

Водопоглощение X , %, определяется по формуле $X = (g_1 - g_0) / g_0$, где g_0 — масса образца в исходном состоянии, г; g_1 — масса образца после пребывания в воде, г.

Точно также определяют поглощение растворителей, например, метилхлорида, как показано в табл. 3.7.

Таблица 3.6. Поглощение растворителей

Материал	T _g , °C	Водопоглощение, %	Насыщение метиленхлоридом, %
FR-4 – эпоксидная смола	140	0.1	0.7
FR-4 – эпоксидная смола с наполнителем	155	0.22	0.42
FR-4 – эпоксидная смола с высокой T _g	180	0.1	0.7
BT/эпоксидная смола	185	<0.5	0.7
Эпоксидная смола с низкими потерями	210	0.1	0.7
Цианотный полиэфир	250	<0.5	0.32
Полиимид	250	0.35	0.41

Влагостойкость диэлектрических оснований фольгированных материалов зависят от вида наполнителя (бумага, ткань, стеклоткань). в меньшей мере — от связующего, а также в значительной степени — от совместимости связующего с наполнителями, т. е. от качества пропитки наполнителя и полноты отверждения связующего.

Гетинаксы, поскольку для их изготовления используют бумагу, обладают относительно низкой влагостойкостью, склонностью к набуханию, разрушающему конструкции печатных плат. Для стеклотекстолитов важен тот факт, что смолы плохо смачивают поверхность стеклянного волокна, поскольку оно, в отличие от волокон органического происхождения, не имеет микропор и шероховатостей. Это приводит к образованию на поверхности раздела стекловолокно-смола воздушных полостей, которые, в основном, и вызывают снижение диэлектрических характеристик в процессе увлажнения. Попытки повысить влагостойкость стеклотекстолитов путем удаления из стеклоткани замасливателя не дали ожидаемого эффекта, по-видимому, в связи с тем, что и в этом случае смачивающая способность связующего остается недостаточной. Для ее увеличения в связующее вводят поверхностно-активные по отношению к стекловолокну вещества. Выбор таких веществ ограничен, так как при введении в стеклотекстолит они должны не ухудшать, а улучшать диэлектрические свойства материала. Исходя из этих соображений, для аппретирования стеклоткани используют силановые реагенты.

Влагостойкость фольгированных диэлектриков оказывает прямое влияние на состояние электрической изоляции, поэтому ее обычно оценивают через изменение электрических параметров.

3.7.1.5. Температурный коэффициент линейного расширения

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) равен среднему в интервале температур ΔT относительному удлинению образца: $\alpha = (l_T - l_0) / \Delta T l_0$. Он имеет разные значения в различных диапазонах температур. Поэтому в каждом случае необходимо оговаривать диапазон температур, к которому относится указываемое значение коэффициента. Кроме того, нужно оговаривать направления, по которым оценивается ТКЛР: по осям X-Y расширяющееся связующее армировано волокнами ткани, по оси Z армирующий материал работает только, как наполнитель и хотя, и, уменьшает температурное расширение, но не в такой степени, как по осям X-Y.

Таблица 3.8. Температурные коэффициенты расширения композиционных материалов

Материал	T _g , °C	Расширение по оси Z, %, в диапазоне от 50 до 260 °C	Расширение по осям X-Y, 10 ⁻⁴ /°C, в диапазоне температур от минус 40 до +125 °C
FR-4 – эпоксидная смола	140	4,5	12...16
FR-4 – эпоксидная смола с наполнителем	155	3,7	12...14
FR-4 – эпоксидная смола с высокой T _g	180	3,7	10...14
BT/эпоксидная смола	185	3,75	10...14
Эпоксидная смола с низкими потерями	210	3,5	10...14
Цианатный полиэфир	250	2,7	11...13
Полиимид	250	1,75	12...15
APPE	170...210	3,0	14...18

3.7.1.6. Теплопроводность материала основания

Примерные значения коэффициента теплопроводности изоляционных оснований фольгированных диэлектриков, Вт/(м·°C), следующие: XXXPC – 0,245; FR-1 – 0,23; FR-4 – 0,26; FR-5 – 0,26; медь – 389,6.

3.7.1.7. Огнестойкость (горючесть).

Этот параметр характеризует способность материала к самогашению после принудительного воспламенения от внешнего источника. Инициатором этого требования явились страховые компании. Если в аппаратуре используются материалы, способные гореть, страховой полис не оформляется. Требования к самогашению вырабатывают лаборатории страховщиков. Общая методика испытаний на горючесть установилась следующая. Испытание проводится на материале с удаленной фольгой. Образцы для испытаний должны представлять собой обрезки материала длиной приблизительно 125 и шириной 12 мм. Края образцов должны быть гладкими. На расстоянии 25 мм

от испытываемого края образца наносится маркировочная линия. Испытания проводятся на воздухе без сквозняков. Поэтому, если наблюдения проводятся в вытяжном шкафу, на время непосредственного испытания вытяжка (вентилятор) выключается. Образец закрепляется горизонтально, но его поперечная ось должна быть наклонена к горизонтальной плоскости под углом 45°.

К образцу подносится пламя газовой или спиртовой горелки так, чтобы кончик пламени только касался торца испытываемого образца. Через определенное время пламя горелки отводится в сторону, а дверца вытяжного шкафа закрывается до конца горения. Огнестойкость материала характеризуется временем горения образца от момента удаления пламени горелки до полного затухания пламени на образце. Одновременно с этим фиксируется, перешло ли горение за маркировочную линию, плавится ли материал и, если при плавлении образуются падающие капли, горят ли капли.

Установлено три уровня требований к огнестойкости материалов.

1. Образец должен потухнуть в течение 10 с после приложения пламени в течение 50 с.

2. Образец должен потухнуть в течение 30 с после приложения пламени в течение 250 с.

3. Образец должен потухнуть в течение 30 с после приложения пламени в течение 250 с без образования горящих капель.

3.7.1.8. Коробление

Измерение деформации листовых фольгированных материалов, т. е. отклонение их от плоской формы, принято характеризовать стрелой прогиба. Для определения стрелы прогиба к вогнутой поверхности листа в направлении наибольшей кривизны прикладывают легкую линейку, затем измеряют максимальный зазор между поверхностью материала и линейкой. Масса линейки не должна влиять на результат измерения. Предпочтительная длина линейки – 1 м. Результат измерения стрелы прогиба с учетом длины всей линейки можно считать правильным, если кривизна листа равномерна.

При измерении коробления испытываемый лист кладется на горизонтальную поверхность вогнутой стороной вниз так, чтобы три угла нижней стороны листа касались горизонтальной поверхности. Коробление характеризуется расстоянием по вертикали между горизонтальной поверхностью и четвертым углом листа.

3.7.1.9. Нагревостойкость

При нагревании могут происходить структурирование и деструкция связующего. При структурировании молекулярная масса полимера увеличивается, жесткость его повышается, в результате чего механическая прочность его сначала растет. При деструкции происходит снижение молекулярной массы и механической прочности слоистого пластика. Термоокислительная деструкция связующего сопровождается выделением низкомолекулярных продуктов. Скорости структурирования и деструкции зависят от температуры.

Особое место должно уделяться одностороннему нагреву, имитирующему тепловыделения мощных элементов на плате. Интенсивный односторонний нагрев вызывает постепенные необратимые структурные изменения связующего, снижающие электрическую и механическую прочность материала. В этих условиях вредную роль играет сравнительно низкая теплопроводность материала.

Испытание на устойчивость к температурным напряжениям (Misling) состоит в обнаружении внутренних дефектов материала основания, при котором стекловолокна отделяются от смолы обычно в местах пересечения нитей ткани. Данный дефект проявляется в виде отдельных белых пятен или перекрестий внутри материала основания и обычно вызывается термоударом. Для испытаний готовят образец размером 50×75 мм, с которого удаляют фольгу травлением. Испытания проводят в автоклаве, в качестве которого можно использовать бытовую скороварку. Образец размещают в автоклаве над водой. При нагреве автоклава температура должна подняться до 120° С, избыточное давление 100 кПа (1 бар) за 15 мин. В течение 25 мин автоклав выдерживают при этой температуре затем быстро охлаждают под холодной водой. Образцы вынимают и высушивают в нормальных условиях в течение 1 ч.

Высушенные образцы погружают на половину длины в горячий припой на 15 с, после извлечения и удаления прилипшего припоя осматривают на вздутие, побеление и расслоение. Кромку, шириной в 1 см — при осмотре не учитывают.

Современная техника испытаний привлекает к оценке нагревостойкости современные методы термографического анализа: термомеханические, термогравиметрические и др.

К понятию нагревостойкости относится также дугостойкость, определяющая время горения электрической дуги по поверхности материала до образования ожога — углеродной дорожки.

В табл. 3.9 приведены эти данные.

Таблица 3.9. Термометрические характеристики диэлектрических оснований фольгированных материалов

Материал	Tg, °C	Термомеханическая устойчивость при температуре 260°C, («T260»), мин	Температура деструкции, °C соответствующая 5% потери массы	Дугостойкость, с
FR-4 — эпоксидная смола	140	8...12	290...310	65
FR-4 — эпоксидная смола с наполнителем	155	13	317	124
FR-4 — эпоксидная смола с высокой Tg	180	4...30	300...330	65
BT/эпоксидная смола	185	30+	334	118
Эпоксидная смола с низкими потерями	210	30+	357	123
Цианатный полиэфир	250	30+	376	160
Полиимид	250	30+	389	136
APPE	170...210	30+	360	

3.8. Прочность сцепления фольги с диэлектриком

Прочность сцепления фольги с диэлектрическим основанием определяет устойчивость печатных плат в составе узлов и блоков к воздействиям вибрации, тепла и особенно операций ремонта (перепаяек). Это очень важный параметр качества фольгированных материалов, поэтому он выделен в отдельный раздел.

3.8.1. Методические вопросы

3.8.1.1. Способы отрыва фольги

Принципиально возможно определить прочность сцепления фольги с диэлектриком методом отрыва, отслаивания полоски фольги с постоянной скоростью или постоянной нагрузкой (рис. 3.16).

Первый метод вызывает значительные затруднения в равномерной передаче усилия на плоскость фольги и в зацеплении с фольгой без нарушения исходной прочности сцепления. В последнем случае надрез фольги делают так, что полоска равномерно расширяется и, если приложить к ее кончику постоянную нагрузку (подвесить гирьку, например), отрыв остановится на той ее ширине, которая соответствует приложенной нагрузке.

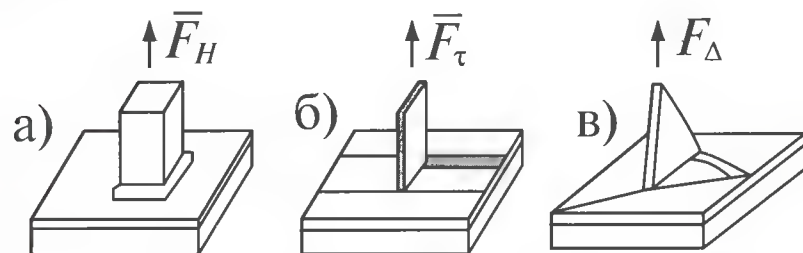


Рис. 3.16. Измерения прочности сцепления фольги с диэлектриком: а — метод отрыва; б — метод отслаивания с постоянной скоростью; в — метод фиксированной нагрузки

Принято, прочность сцепления фольги с диэлектриком характеризовать усилием отрыва полоски фольги от основания (вторым методом — рис.3.16-б). Прочность сцепления, в этом случае выражается минимальным или средним значением усилия, отнесенным к 1 см ширины ($H/см$), путем деления показания индикатора на ширину отрываемой полоски.

При таком определении прочности сцепления площадь отрыва фольги расположена непосредственно в месте изгиба медной полоски в вершине прямого угла между фольгой и основанием.

3.8.1.2. Зависимость усилия отрыва от толщины фольги

Так как в этом случае фольга большей толщины образует изгиб большего радиуса, чем фольга меньшей толщины, то площадь сцепления в месте отрыва, а следовательно, и усилие отрыва для более толстой меди будут больше при прочих равных условиях.

Эту зависимость можно оценить по формуле $F_T = k A^{3/4}$, где F_T — усилие отслаивания; k — коэффициент пропорциональности; A — толщина фольги.

Если принять прочность сцепления фольги толщиной 50 мкм за единицу, то при толщине 35 мкм усилие отслаивания составит 0,88, а при 20 мкм — 0,5.

Прочности сцепления, определенные методами отрыва (F_H) и отслаивания (F_T) (см. рис. 3.16) можно сравнить следующим образом: $F_H [кН/м] \sim 20 F_T [кН/м]$.

3.8.1.3. Приспособления для отрыва фольги

Очень важно, чтобы усилие отрыва было направлено под прямым углом к поверхности материала, так как радиус отрыва в этом случае будет сохранять устойчивые значения (рис. 3.17). Обычно, допускаются отклонения от прямого угла в пределах 5° (рис. 3.17, а). Если расстояние между образцом и местом крепления достаточно велико, то в процессе испытаний вариации угла не превысят 5° . Однако в большинстве случаев угол отрыва обеспечивают применением специальных приспособлений по типу показанных на рис. 3.17. Во всех случаях скорость отрыва должна составлять 50 мм/мин.

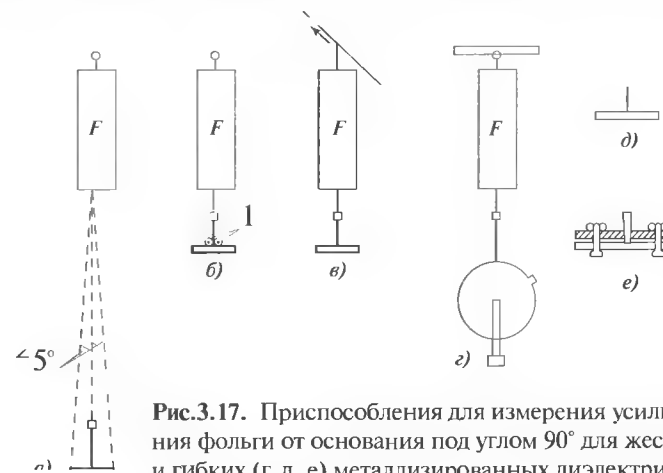


Рис.3.17. Приспособления для измерения усилий отслаивания фольги от основания под углом 90° для жестких (а, б, в) и гибких (г, д, е) металлизированных диэлектриков: F — динамометр. Угол отслаивания, близкий к 90° , обеспечивается большим расстоянием от образца до траверсы (а); свободно вращающимися роликами 1, по которым перемещается образец по мере отрыва полоски фольги (б); перемещением траверсы под углом 45° (в); закреплением гибкого образца на свободно вращающемся цилиндре (г). Гибкий образец может быть приклеен к жесткому основанию (д) или механически закреплен на жестком основании (е)

3.8.1.4. Ширина полоски фольги для отрыва

Выбор ширины полоски фольги связан с разрешением противоречия: необходимо, чтобы результаты измерения на разных образцах одного качества были однозначными и, в то же время, достоверными. Дело в том, что клеевой шов неизбежно имеет дефекты локального характера, проявляющие себя только при небольшой ширине полоски фольги (около 0,5...1,0 мм). В этом случае, диаграмма усилий отрыва по длине полоски имеет широкий размах от минимума к максимуму. Сравнить качество материалов по таким диаграммам затруднительно. Поэтому ширину полосок для отрыва фольги выбирают в разумных пределах, удовлетворяя требования как постоянно увеличивающейся плотности печатного монтажа, так и устойчивости результатов измерений. На рис. 3.18 показаны для сравнения диаграммы усилий отрыва полосок разной ширины, приведенные к одной ширине.

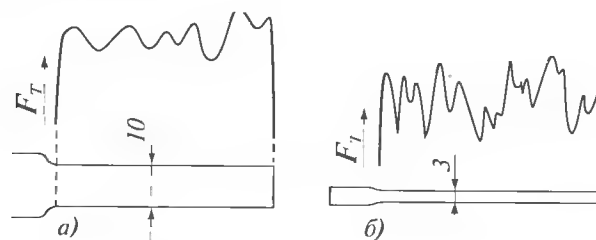


Рис. 3.18. Диаграммы усилия отрыва полосок фольги разной ширины

Вообще говоря, ширина полоски при испытании материала должна соответствовать принятым нормам на размер элементов на печатной плате. Но это приводит к неопределенностям во взаимоотношениях поставщиков и потребителей. Принято использовать полоску фольги шириной 0,79 мм (0.032 in) для испытаний на химическую стойкость и 3,18 мм (0.125 in) для других испытаний.

3.8.1.3. Определение стойкости к воздействию пайки (термоудару)

Уменьшение размеров печатных проводников и контактных площадок осложняет задачу сохранения прочного сцепления фольги

с диэлектриком в условиях пайки и перепаяк, когда происходят интенсивная термическая деструкция клея и газовыделение продуктов деструкции.

Непосредственно во время температурного воздействия когезия (собственная прочность клея, связующего) ослабляется настолько, что прочность сцепления фольги с диэлектриком при температурах пайки составляет 5...10 % от силы сцепления в нормальных условиях. Именно поэтому очень важно обеспечить отсутствие каких-либо механических нагрузок на фольгу во время пайки. После восстановления нормальных условий прочность сцепления составляет примерно 80 % исходного значения. Многократные пайки неоднозначно уменьшают прочность сцепления, вплоть до полного разрушения клеевого шва. Дополнительным фактором, вызывающим разрушение клеевого шва, является разность в температурных расширениях медной фольги и диэлектрического основания.

Особенность испытаний на устойчивость к пайкам состоит в отсутствии возможностей имитировать условия пайки в прямом виде, так как наличие припоя на фольге грубо искажает результаты измерения усилий отрыва фольги от основания (см. п. 3.6.1.2). Поэтому условия пайки (термоудар) имитируют погружением образцов с полосками фольги в силиконовое масло или расплавленный припой, разогретые до рабочих температур пайки. В последнем случае фольгу припудривают тальком или смазывают силиконовым вазелином, чтобы припой не смачивал поверхности меди.

Образцы фольгированного материала помещают на расплавленный припой плашмя так, чтобы обратная его сторона не покрывалась припоем, т.е. он должен плавать на поверхности припоя. В силиконовое масло образец погружается целиком на глубину не менее 25 мм. Время погружения в жидкость или припой составляет 5...20 с в зависимости от требований, реализуемых данным типом материалов. При испытании тонких фольгированных материалов образцы вкладывают в рамку из материала с малой теплопроводностью (стеклотекстолит, фторопласт и т. п.)

Испытания требуют точного поддержания температуры в пределах $\pm 2^\circ \text{C}$. Самые незначительные отклонения режимов приводят к искажению результатов, так как стойкость фольгированных материалов резко уменьшается при незначительном превышении температуры и продолжительности ее действия сверх установленной нормы.

Нужно сказать, что среда и способ нагрева существенно влияют на результаты испытаний материала (рис. 3.19), так как от этого зависит интенсивность нагрева образцов.

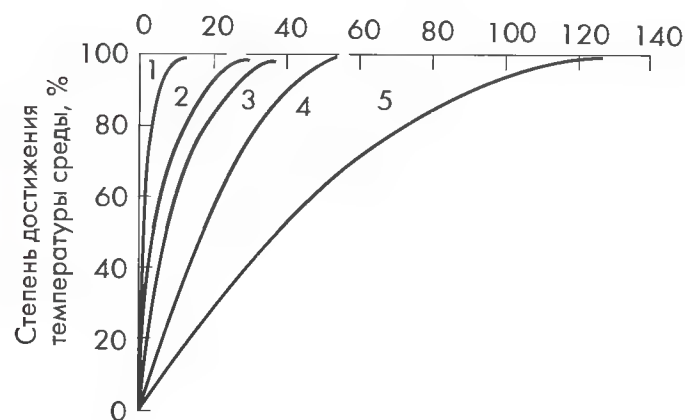


Рис. 3.19. Интенсивность нагрева образцов при испытаниях на термоудар в разных средах: 1 — расплавленный припой; 2 — глицерин; 3 — конденсация паров; 4 — псевдооживленная среда (песок); 5 — горячий воздух

Немаловажное значение при этом имеют теплоемкость и изменяющаяся от температуры вязкость материала среды — теплопередача осуществляется, в основном, в приповерхностном слое образца. Расплавленный припой наиболее близок к реальным условиям использования материала. Псевдооживленный слой порошкового теплоносителя обеспечивает менее интенсивный нагрев, однако создает возможность одновременно с нагревом проводить электрические измерения изоляции.

Стойкость к термоудару методически правильно оценивать значениями температуры и времени, при которых прочность сцепления фольги уменьшается до 80 % от исходной прочности. Но это трудоемкий процесс, связанный с большим количеством испытаний. Поэтому в последнее время отработалась методика, по которой образец на 10 с помещается на плаву припоя, нагретого до температуры 288°C, и после остывания измеряется усилие отрыва фольги.

3.8.1.4. Определение стойкости к воздействию химических растворов

Испытание проводится выдержкой образца в последовательности различных растворов. Исторически, сложилось испытывать материал в парах трихлорэтилена, имитирующих прежний процесс удаления органопроявляемого фоторезиста или краски. Для этого образец погружают на 75 с в растворитель при температуре 23°C. Затем, после сушки, образец погружают на 5 мин в раствор гидроокиси натрия плотностью 10 г/л при температуре 90°C и, после отмытки — на 30 мин в раствор серной кислоты (10 г/л) и борной кислоты (30 г/л) при температуре 60°C. После этого образец отмывают, тщательно сушат и погружают на 40 с в горячее масло, нагретое до температуры 220°C. Наконец, образец помещается в обезжиривающую жидкость, отмывается, сушится и, спустя 24 ч, исследуется на отсутствие расслоений, вздутий и на соответствие требованиям по прочности сцепления фольги. Испытания в горячем масле допускается заменять на другую горячую жидкость или горячий воздух.

В табл. 3.10. приведены значения усилий отрыва фольги толщиной 35 мкм после стандартных воздействий.

Таблица 3.10. Значения усилий отрыва фольги

Материал	T _g , °C	Усилие отрыва, г/мм		
		после воздействия припоя	после нагрева	после воздействия химических растворов
FR-4 — эпоксидная смола	140	12,0	9,4	12,0
FR-4 — эпоксидная смола с наполнителем	155	9,4	9,1	9,1
FR-4 — эпоксидная смола с высокой T _g	180	12,0	9,4	12,0
BT/эпоксидная смола	185	11,9	11,1	12,6
Эпоксидная смола с низкими потерями	210	10,0	10,8	12,0
Цианатный полиэфир	250	10,7	10,0	10,1
Полиимид	250	10,0	8,0	9,4
APPE	170...210	8,2	8,2	9,5

3.8.1.5. Стойкость к условиям, имитирующим гальванический процесс.

Испытания проводятся в растворах сульфата натрия с имитацией гальванического процесса. Методом травления на образце формируют полоски фольги шириной 0,75...1,5 мм, так как при большой их ширине воздействие электролитов незаметно.

В соответствии с рекомендациями МЭК для этих испытаний используется раствор безводного сернокислого натрия в дистиллированной воде 10 г/л. Испытуемый образец с четырьмя полосками фольги помещается в раствор при температуре 70° С. В качестве анода служит угольный стержень, а катодом — испытуемый образец. Время воздействия — 20 мин, плотность тока — 2,15 А/дм².

После воздействия образцы контролируются на отсутствие отслоений и вздутий, а затем — на прочность сцепления фольги с основанием. Как правило, образцы после этих испытаний должны сохранять 80...95 % исходной прочности.

3.9. Электрические испытания

3.9.1. Сопротивление диэлектрика

3.9.1.1. Сопротивление токам утечки по объему и по поверхности

В зависимости от направления токов утечки различают объемное ρ_v и поверхностное ρ_s электрические сопротивления диэлектрика.

При испытаниях электроизоляционных материалов необходимое напряжение подводится к образцу с помощью специально нанесенных на него электродов. Для плоского участка изоляции толщиной h (см) с площадью измерительного электрода S (см²) объемное сопротивление равно:

$$R_v = \rho_v \cdot h / S, \text{ где } \rho_v \text{ — удельное объемное сопротивление, Ом}\cdot\text{см.}$$

$$\rho_v = R_v \cdot S / h.$$

Поверхностная проводимость обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Даже при тончайшем таком слое обнаруживается заметная электропроводность, определяемая в основном толщиной слоя влаги. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностное сопротивление обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s характеризуется сопротивлением между параллельными проводниками длиной b , отстоящими друг от друга на расстоянии h , без учета объемного тока утечки через толщину материала:

$$R_s = \rho_s \cdot h / b, \text{ где } \rho_s \text{ — удельное поверхностное сопротивление, Ом.}$$

$$\rho_s = R_s \cdot b / h.$$

Для измерения поверхностного и объемного сопротивления фольгированных материалов на одну из сторон испытуемого образца наносят рисунок кольца и круга (рис. 3.20). Если диэлектрик фольгирован с двух сторон, фольгу обратной стороны оставляют для большинства испытаний. Чтобы создать реальные условия проникновения влаги в объем диэлектрика, при испытаниях на влагоустойчивость фольгу обратной стороны стравливают, а перед измерениями сопротивления изоляции к поверхности образца прикалывают электрод из отожженной алюминиевой фольги (толщиной не более 10 мкм) с помощью тонкого слоя вазелина трансформаторного масла или кремнийорганической смазки. Толщина слоя смазки не должна превышать 1 мкм. Также поступают при испытаниях односторонних диэлектриков.

Разделение токов утечки по поверхности и объему осуществляется соответствующим подсоединением электродов к измерительным приборам. Рисунок 3.21 показывает, как это делается при использовании гальванометра. Однако эти схемы подсоединения остаются в силе и при использовании других приборов, в том числе и для электронных терметров.

При использовании системы круглых электродов, показанных на рис. 3.20, расчет удельных значений объемного и поверхностного сопротивлений изоляции производится по формулам:

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{\pi D}{4h}; \quad \rho_s = R_s \cdot \frac{2,7}{\lg \frac{D}{L}}.$$

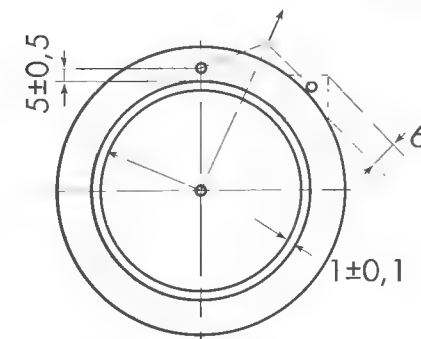


Рис. 3.20. Электроды для измерения объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков

где ρ_v — удельное объемное сопротивление, Ом·см; ρ_s — удельное поверхностное сопротивление, Ом; R_v и R_s — измеренные значения объемного и поверхностного сопротивлений по схемам рис. 3.20; D_A — диаметр измерительного электрода А, см; D_B — внутренний диаметр охранного электрода В, см.

Таблица 3.11. Характеристики электрической изоляции диэлектрических оснований фольгированных материалов.

Материал	Объемное сопротивление, Ом·см		Поверхностное сопротивление, Ом		Электрическая прочность, кВ/мм
	[96/35/90]*	(24/125)**	[96/35/90]*	(24/125)**	
FR-4 — эпоксидная смола	10^8	10^7	10^7	10^7	50
FR-4 — эпоксидная смола с наполнителем	10^{11}	10^{10}	10^8	10^9	50
FR-4 — эпоксидная смола с высокой Tg	10^8	10^7	10^7	10^7	50
BT/эпоксидная смола	10^7	10^7	10^6	10^7	50
Эпоксидная смола с низкими потерями	10^8	10^7	10^7	10^7	50
Цианатный полиэфир	10^7	10^7	10^7	10^7	65
Полиимид	10^7	10^7	10^7	10^7	50

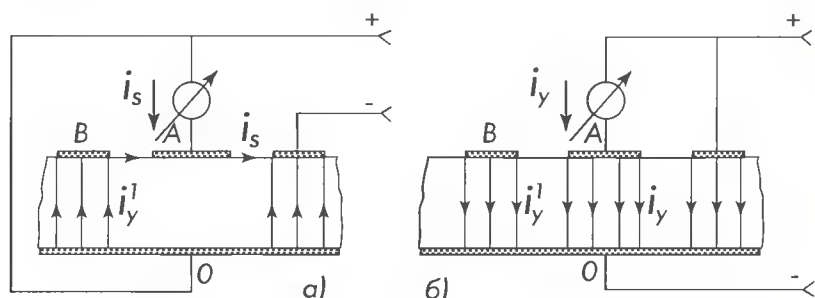


Рис. 3.21. Схемы измерений объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков.

В таблице 3.11 приведены примерные характеристики некоторых фольгированных материалов по сопротивлению изоляции.

3.9.1.2. Сопротивление токам утечки вдоль слоистых пластиков

Объемное сопротивление слоистых материалов, каковыми являются большинство фольгированных диэлектриков, зависит еще и от направления тока утечки по отношению к слоям, так что сопротивление току утечки перпендикулярно слоям (обычное измерение ρ_v) больше сопротивления вдоль слоев. Последний случай тока утечки характеризуют внутренним сопротивлением электроизоляционного материала ρ_v .

Измерение внутреннего сопротивления R_i вдоль слоев производится по ГОСТ 6433 с помощью конусных электродов на образцах с удаленной фольгой. Предварительно, в образце рассверливаются отверстия на расстоянии между центрами (25 ± 1) мм. Затем отверстия обрабатываются разверткой с конусностью 1:50. Латунные электроды плотно вставляются в конусные отверстия так, чтобы обеспечить надежное контактирование поверхностей электродов с поверхностью отверстий.

Для практической оценки электроизоляционных свойств фольгированных материалов для печатного монтажа используют электроды в виде вдвинутых одна в другую «гребенок». Длина диэлектрического зазора такой системы электродов составляет 600 мм. Определение электроизоляционных характеристик материалов с помощью «гребенки» в большей степени приближается к условиям их применения в производстве печатных плат.

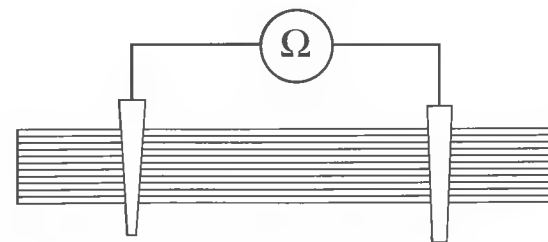


Рис. 3.22. Электроды для измерения внутреннего сопротивления изоляции слоистых пластиков.

3.9.2. Электрическая прочность изоляции

3.9.2.1. Стандартные испытания электрической прочности

Электрическая прочность диэлектрика характеризует его способность противостоять пробой, т. е. разрушению под воздействием электрического поля. Количественно, электрическая прочность определяется значением напряженности однородного электрического поля $E_{пр}$, при которой происходит пробой. Соответствующее пробоему напряжение носит название пробивного напряжения $U_{пр}$. Напряженность электрического поля, вызывающего пробой в однородном поле: $E_{пр} = U_{пр}/h$, где h — толщина образца в месте пробоя, мм; $U_{пр}$, кВ.

Электрическую прочность обычно определяют в масле, во избежание поверхностного пробоя. Испытательное напряжение поднимают медленно, плавно или ступенчато так, чтобы при каждом значении напряженности могли сформироваться условия возможного пробоя (ГОСТ 6433 устанавливает скорость подъема напряжения 1 кВ/с, но не менее чем, за 10 с).

Электрическая прочность диэлектрика зависит от его толщины, формы и размера электродов, времени приложения напряжения, частоты и формы напряжения, условий окружающей среды. Поэтому характеристика материала по значению $E_{пр}$ не имеет смысла без указания условий испытаний.

3.9.2.2. Электрическая прочность вдоль слоев

В объеме слоистых пластиков вдоль слоев всегда сосредоточено гораздо больше несплошностей и дефектов. Поэтому электрическая прочность вдоль слоев гораздо слабее, чем в поперечном (трансверсальном) направлении.

Значения электрической прочности вдоль слоев (параллельно слоям):

Электрическая прочность кВ/мм: при температуре, °С:	Гетинакс XXXPC	Стеклотекстолит FR-4
20±5	1	3
90±5	0,5	2

Из приведенных данных видно, что для большинства случаев существенной характеристикой электрической прочности слоистых электроизоляционных материалов является ее значение параллельно слоям.

3.9.3. Диэлектрическая проницаемость

При прочих равных условиях, емкость электрических конструкций пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости электроизоляционного материала, определяемой отношением $\epsilon_r = C/C_0$, где C — емкость конденсатора, диэлектриком которого служит данный изоляционный материал, а C_0 — емкость такого же по форме и размерам конденсатора, диэлектрик которого — вакуум.

Диэлектрическую проницаемость вычисляют по измеренной емкости и размерам образца с учетом его формы. Емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S/h,$$

где S — площадь обкладки, см²; h — толщина диэлектрика, см; $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}$ — диэлектрическая постоянная, Ф/см.

Для значения емкости, выраженной в пикофарадах, $C = \epsilon_r S/3,6 \cdot \pi h$. Отсюда относительная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon_r = 3,6 \cdot \pi h C/S$$

Поскольку при испытаниях фольгированных слоистых пластиков используют электроды круглой формы, предыдущую формулу приводят к диаметру измерительного электрода:

$$\epsilon_r = 14,4 h C/D^2.$$

Если толщина образца h больше чем на 5 % диаметра электрода D , вводят поправку на краевую емкость $C_{кр}$, пользуясь графиком рис. 3.23. Измеренная емкость $C_{изм}$ складывается из двух величин: $C_{изм} = C + C_{кр}$, где C — истинное значение емкости.

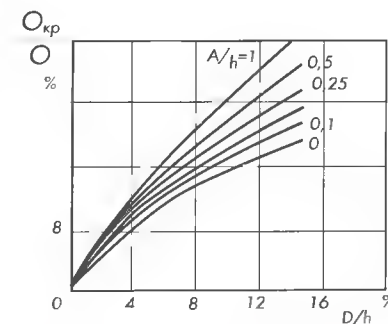


Рис. 3.23. График определения краевой емкости.

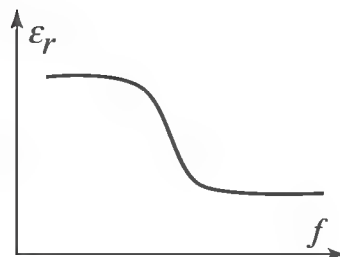


Рис. 3.24. Зависимость диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков от частоты

Диэлектрическая проницаемость материалов с дипольной поляризацией характеризуется зависимостью от частоты (рис. 3.24). Перелом этой зависимости для стеклопластиков с эпоксидным связующим приходится на частоту 200—400 кГц. Поэтому при указании значения ϵ_r диэлектриков называют частоту, при которой производилось измерение. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r стандартных фольгированных материалов на частоте 1 МГц — в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Диэлектрическая проницаемость ϵ_r и характеристика потерь $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрических оснований фольгированных материалов.

Связующее	Армирующие волокна	ϵ_r		$\operatorname{tg} \delta$	
		1 МГц	1 ГГц	1 МГц	1 ГГц
Эпоксидная смола	Стеклоткань	4.4	3.9	0.025	0.015
Эпоксидная смола	Арамидные волокна	3.9	3.8	0.024	0.019
Эпоксидная смола+РРО	Стеклоткань	3.9	3.9	0.011	0.009
Эпоксидная смесь	Стеклоткань	3.9	3.8	0.009	0.010
Эпоксидная смесь	Кварц	3.6	3.5	0.008	0.007
Цианатный полиэфир	Стеклоткань	3.8	3.5	0.008	0.006
Полиимид	Стеклоткань	4.3	3.7	0.013	0.007
APPE	Стеклоткань	3.7	3.4	0.005	0.007
APPE	Кварц	3.4	3.0	0.003	0.004
PTFE	Стеклоткань	2.3	2.3	0.0013	0.0009
Эпоксидная смола	PTFE	3.0	2.8	0.023	0.019
Цианатный полиэфир	PTFE	2.5	2.6	0.0038	0.0035
Поликарбонат	Стеклоткань	3.4	3.3	0.0025	0.0024

Нужно иметь в виду, что композиционные диэлектрики приобретают диэлектрическую проницаемость, складывающуюся по определенным законам из проницаемости компонентов. Так, в материале типа FR-4 стеклоткань из алюмоборосиликатного стекла имеет диэлектрическую проницаемость порядка 9, а эпоксидная смола — 3,5, и, в зависимости от их соотношения, ϵ_r может принимать широкий диапазон значений. При нанесе смолы 60...65% по массе $\epsilon_r = 4.4$, а при нанесе 50% — $\epsilon_r = 5,5$.

3.9.4. Диэлектрические потери

Потери в диэлектрике при переменном напряжении характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, показывающим отношение общих потерь мощности в материале к произведению напряжения и тока в конденсаторе, в котором исследуемый материал работает в качестве диэлектрика.

Потери в диэлектрике зависят от частоты переменного напряжения и от температуры. Поэтому, так же как и для диэлектрической проницаемости, условия измерения тангенса угла потерь диэлектриков особо оговариваются. Значения $\operatorname{tg} \delta$, указанные в табл. 3.13.

Значения $\operatorname{tg} \delta$ определяют удельную мощность рассеивания в печатных линиях связи и, в конечном счете, коэффициент затухания сигнала $p = 2\pi E^2 f \epsilon \operatorname{tg} \delta$, где p — плотность мощности, Вт/см², f — частота (Гц) поля напряжением U (В). Или $P = 2\pi U^2 f C \operatorname{tg} \delta$, где P — погонная мощность потерь, Вт/см; f — частота переменного напряжения, Гц; C_n — погонная емкость линии, нФ/см; U — напряжение сигнала, В.

3.9.4. Электрическое сопротивление фольги

Измерение сопротивления фольги производится четырехзондовым методом на образце фольгированного материала шириной примерно 25 мм и длиной около 300 мм (рис. 3.25).

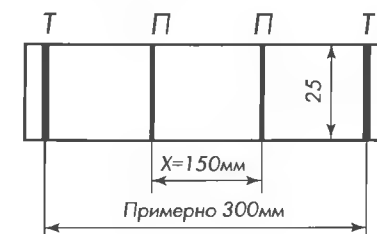


Рис. 3.25. Линии контактирования для измерения электрического сопротивления фольги: Т — токовые контакты, П — потенциальные контактные.

Наиболее часто употребляемые марки медной фольги имеют следующие значения электрического сопротивления:

Толщина, мкм	18	35	50	70	105
Сопротивление, мОм	7,5	3,5	2,5	1,75	1,05

3.10. Размерная стабильность тонких фольгированных стеклотекстолитов

Причины деформаций тонких фольгированных стеклопластиков после вытравливания рисунка заложены в усадочных явлениях в процессе изготовления материалов. Различают химическую, релаксационную и температурную усадки связующего. Если первая зависит от типа полимера и законченности реакции полимеризации при отверждении, то вторая, в основном, определяется остаточными напряжениями в композиции фольга-диэлектрик. При вытравливании фольги эти напряжения реализуют себя в виде усадки. Температурные расширения или сжатия полимеров тоже фиксируется при прессовании фольгированных материалов и реализуют себя при стравливании фольги.

Эксперименты подтверждают, что для связующих на основе композиции эпоксидных смол, отличающихся уникально малыми усадками при полимеризации, основные остаточные напряжения во многом обусловлены различием температурного расширения стекла и связующего — полимера.

Температурный режим процесса отверждения полимерного связующего характеризуется тремя периодами. В начальном периоде прессования связующее в результате нагрева до температуры полимеризации переходит в вязкотекучее состояние. За ним следуют процесс полимеризации, химическая усадка полимера и возникают адгезионные связи связующего к стеклонаполнителю. При охлаждении возникают усадочные напряжения, обусловленные коэффициентами температурного расширения стекла и смолы. В результате, стеклотекстолит оказывается в сжатом состоянии, и после удаления медной фольги линейные размеры его увеличиваются. При нагреве печатных слоев в процессах сушки и прессования происходит его структурирование, при котором в связующем продолжают процессы химической усадки, т. е. его линейные размеры опять меняются. Противоборство этих явлений приводит к разнообразным знакам и типам деформаций тонких стеклотекстолитов.

Измерение линейных размеров нормировано соответствующими техническими условиями на тонкие фольгированные материалы. Сущность методики измерения состоит в том, что на образцах размером 160×160 мм в углах квадрата 100×100 мм наносят реперные знаки либо перекрещивающимися царапинами, либо фотохимическим способом, либо сверлением. Реперные знаки тем или другим способом защищаются от травления, остальную фольгу с образцов стравливают. По изменению позиционного положения реперных знаков относительно виртуальных координат судят о деформации материала.

Этот метод достаточно полно отражает размерную стабильность тонких фольгированных материалов. Однако малое число реперных знаков (4) приводит к незначительной чувствительности метода к многим типам смещений; в состав методики не входит операция, имитирующая процесс прессования, который создает дополнительную деформацию слоев.

Свободен от этих недостатков метод, предусматривающий большее число точек для измерения деформаций (до 25) и включающий в себя имитацию процесса прессования. На рис. 3.26 для примера показана диаграмма образца со смещениями, полученными в результате прессования.

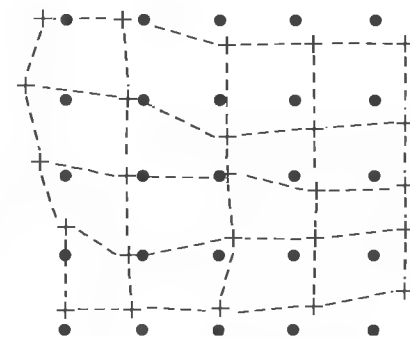


Рис. 3.26. Экспериментальная диаграмма смещения тонкого фольгированного стеклотекстолита в результате прессования

Линейные размеры образцов меняются неодинаково по утку и по основе ткани: наиболее существенное изменение линейных размеров происходит по утку. Поэтому ориентировка листов материала при укладке пакета для прессования существенно сказывается на последующем поведении МПП, в первую очередь на короблении.

Режимы охлаждения отпрессованного материала и дополнительная термическая обработка при температуре 160°C в течение 1,5 ч и последующее охлаждение в течение 5...6 ч снижают деформацию стеклотекстолита. Измерение количества неотвержденного связующего методом экстрагирования показало, что при быстром охлаждении пресса оно составляет 22 %, при медленном — 18 %, при дополнительной термической обработке — (10...12) %. Это свидетельствует о наиболее значительной химической усадке связующего при термической обработке (термостабилизации) фольгированного стеклотекстолита, что способствует снижению остаточных напряжений в материале и приводит в конечном счете к уменьшению его деформаций.

Результирующая деформация материала зависит от количества фольги, стравливаемой при формировании рисунка, и от топологии рисунка. Например, при коэффициенте покрытия 10% изменение линейных размеров составило 0,05 %, а при 40 % — 0,02 %. Поэтому свободные от рисунка поля слоев МПП целесообразно заполнять фальшивыми полигонами.

ГЛАВА 4

ФОТОШАБЛОНЫ

Какие бы процессы печати ни использовались, все они начинаются с фотографического изображения будущего рисунка — фотошаблона, в нашем случае — с изображения топологии схемы со всеми элементами печатного монтажа: проводниками, контактными площадками для пайки, для отверстий, экраны, печатные разъемы, элементы электрической схемы и т.д. Используя фотошаблон получают масочное изображение на сите — сетчатый трафарет для трафаретной печати, рельефное изображение фоторезиста на плоском основании для формирования рисунка субтрактивным или аддитивным методом, рельефные формы для офсетной печати краской или для флексографии.

4.1. Материалы фотошаблонов — носители изображений

Из всего разнообразия фото процессов в техническом (не художественном) их применении установились определенные традиции, основная направленность которых — получить штриховое (без полутонов) изображение большой плотности и большой контрастности. Материалы для фотошаблонов должны обладать в первую очередь высоким градиентом оптической плотности, высокой износостойкостью, позволяющей многократно использовать их в процессах фотопечати и, что очень важно, высокой размерной устойчивостью.

4.1.1. Общие свойства фотоматериалов

Фотоматериалы — светочувствительные материалы, предназначенные для получения фотографических изображений. Различают галогеносеребряные фотоматериалы, в которых светочувствительным элементом является галогенид серебра (AgHal), и несеребряные

(светочувствительный элемент — соединения железа, хрома, соли диазония и др.

Фотоматериалы для фотошаблонов по общей классификации фотоматериалов выделяются следующим образом:

- по назначению — микрофильмирование;
- по воспроизведению цвета объекта съемки — черно-белые монохроматические (с однотонным окрашенным изображением);
- по способу применения — негативные, позитивные, обращаемые;
- по виду подложки — на гибкой полимерной основе, на жесткой основе (фотопластинки, чаще всего из стекла),
- по формату — листовые, рулонные;
- по сенситометрическим характеристикам: общая и эффективная светочувствительность, коэффициент контрастности, фотографическая ширина, оптическая плотность вуали, максимальная оптическая плотность изображения и др.,
- по структурно-резкоостным характеристикам: разрешающая способность, среднеквадратическая гранулярность,
- по физико-механическим свойствам: размерная устойчивость в условиях изменения температуры и влажности, термостойкость, механическая прочность слоев, влагоемкость, скручиваемость.

Основные сенситометрические характеристики фотоматериалов определяют по экспериментальной характеристической кривой (сенситограмме, рис. 4.1), выражающей зависимость между логарифмом экспозиции $\lg H$ и оптической плотностью почернения D , образованного металлическим серебром. Экспозицию H вычисляют по формуле: $H = Et$, где E — освещенность, t — время экспонирования (выдержка). Оптическая плотность участков фотографического слоя, не подвергавшихся действию света, называется оптической плотностью фотографической вуали D_0 . Она не зависит от экспозиции и определяется свойствами самого фотоматериала и условиями его обработки. Принятая в фотографии величина минимальной оптической плотности представляет собой сумму значений оптической плотности вуали и оптической плотности подложки. Наибольшая оптическая плотность почернения (потемнения) фотоматериалов, т.е. плотность в высшей точке характеристической кривой, называют максимальной плотностью $D_{\text{макс}}$.

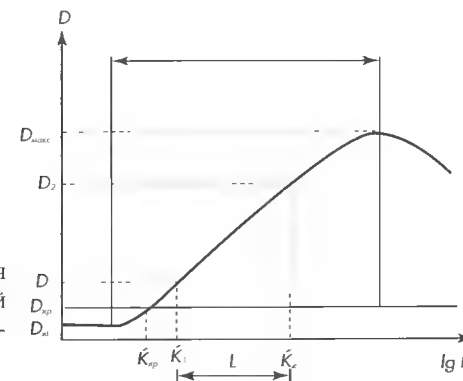


Рис. 4.1. Характеристическая кривая зависимости оптической плотности от экспозиции (пояснение в тексте).

Сенситометрические испытания фотоматериалов проводят в стандартных условиях, при которых важнейшим фактором является цветовая температура источника света — величина, характеризующая спектральный состав излучения источника света. Цветовая температура определяется температурой абсолютно черного тела, при которой его излучение имеет такой же спектральный состав и такое же распределение энергии по спектру, что и излучение данного источника; выражается в Кельвинах. В сенситометрических измерениях обычно используют три цветовые температуры: 2850 K — при испытании фотобумаг; 3200 K — для позитивных киноплёнок; 6500 K — для негативных фотоматериалов.

Светочувствительность S — способность фотоматериалов регистрировать световое излучение и образовывать в фоточувствительном слое материала почернение (потемнение). Светочувствительность ($\text{см}^2/\text{Дж}$) рассчитывается как величина, обратно пропорциональная экспозиции: $S = 1/Et = 1/H$. Светочувствительность измеряют, как правило, в относительных единицах — числах светочувствительности — $S = k/H_{\text{кр}}$, где $H_{\text{кр}}$ — экспозиция, необходимая для получения определенной оптической плотности потемнения $D_{\text{кр}}$ (критерий светочувствительности); k — коэффициент пропорциональности, имеющий определенное принятое значение для каждого из видов фотоматериалов. Для черно-белых негативных фотоматериалов общего назначения за критерий светочувствительности приняты оптическая плотность $D = D_0 + 0,1$ и коэффициент пропорциональности $k = \sqrt{2}$.

Строгого эквивалента между светочувствительностью фотоматериалов и числами светочувствительности не существует; приближенно считают, что 1 единица ГОСТ эквивалентна $10^6 \text{ см}^2/\text{Дж}$.

Коэффициент контрастности — градиент прямолинейного участка характеристической кривой — характеризует способность фотоматериалов передавать различие яркости объекта съемки по различию оптической плотностей потемнений. Определяется как тангенс угла наклона прямолинейного участка кривой к оси абсцисс: $\gamma = \text{tg} \alpha = (D_2 - D_1) / (\lg H_2 - \lg H_1)$.

Фотографическая ширина L определяется как интервал яркостей объектов съемки, передаваемых на изображении с одинаковым коэффициентом контрастности; на характеристической кривой соответствует диапазону логарифмов экспозиций: $L = \lg H_2 - \lg H_1$. Интервал экспозиций, ограниченных верхним и нижним пределами потемнений, называют полным интервалом экспозиции $L_{\text{макс}}$, или полной фотографической шириной.

Разрешающая способность — способность фотоматериала разделять передавать мелкие детали (участки) объекта фотографирования; выражается количеством разрешаемых линий на 1 мм в фотографическом изображении специального тест-объекта (так называемой, резольвометрической меры).

Гранулярность (зернистость) — флуктуации оптической плотности равномерно экспонированного и проявленного фотоматериала; численная оценка зернистой структуры фотографического изображения определяется среднеквадратической гранулярностью.

Серебросодержащие фотопленки могут быть негативными и позитивными. Негатив воспроизводит черным прозрачные места и прозрачным черные места. Позитив воспроизводит черным черным. Диазопленки обычно позитивные. Фотопленки для фотоплоттеров — негативные. Фотопленки для контактной печати могут быть любыми, это зависит от задач репродукции и вида фоторигинала (негатив или позитив). Обычно позитивные фотошаблоны (черные линии — проводники) используются для наружных слоев печатных плат, и негативные (прозрачные линии — проводники) — для внутренних слоев.

Серебросодержащие фотопленки не безразличны к процессам проявления и типам проявителей. Выбор проявителя может сказаться на скорости и глубине проявления, на зернистости и на реализа-

ции чувствительности пленки. Поэтому для проявления фотопленки нужно придерживаться рекомендаций в прилагаемой спецификации.

Серебросодержащие и диазопленки отличаются и по свойствам и по физическим процессам обработки, о чем будет сказано дальше. Но визуальная прозрачность, сопротивление к истиранию и явно лучшая размерная стабильность диазопленок делают их незаменимыми для изготовления прецизионных фотошаблонов. Однако, серебросодержащие фотопленки по большому ряду фотографических характеристик лучше для использования в фотоплоттерах, преобразования изображений и большей части фотоконтрольных работ.

4.1.2. Серебросодержащие фотоматериалы

Сенситометрические и структурно-резкозные показатели серебросодержащих фотоматериалов зависят в основном от размеров, формы и состава микрокристаллов AgHal , а также условий их химической или спектральной сенсibilизации.

Все галогеносеребряные фотоматериалы состоят из светочувствительных (эмульсионных) и дополнительных (вспомогательных) слоев, нанесенных на подложку (рис. 4.2).

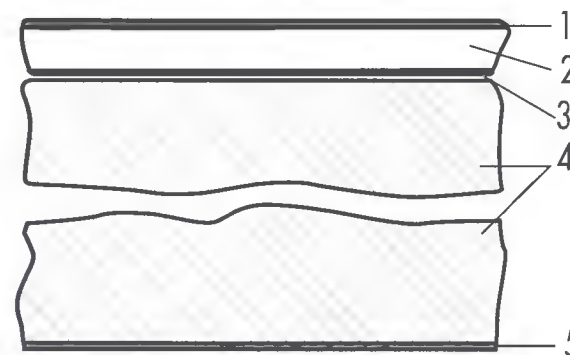


Рис.4.2. Строение черно-белых негативных и позитивных фотопленок: 1 — защитный слой; 2 — светочувствительный слой; 3 — подложка; 4 — подложка; 5 — противоскручивающий антистатический бесцветный лаковый слой.

Основой всех фотоматериалов является светочувствительный слой толщиной 3...30 мкм, который представляет собой суспензию микрокристаллов *AgHal* в связующих — водных растворах желатина, эфирах целлюлозы, агаре, альбумине и др. Нанесенная на подложку и высушенная фотоэмульсия образует светочувствительный слой фотоматериалов. Концентрация желатина в фотоэмульсиях составляет обычно 5...10% по массе, концентрация *AgHal* (в пересчете на металлическое серебро) — 30...150 г *Ag* на 1 л объема фотоэмульсии. Средние линейные размеры микрокристаллов 0,01...10 мкм, их количество в 1 см³ — 10¹⁰...10¹⁶.

Поверхностная концентрация *AgHal* (в пересчете на серебро) от 0,1 г/м² в малочувствительных фотоматериалах до 5...10 г/м² в высокочувствительных негативных фотоматериалах и до 10-35 г/м² — в радиографических материалах. В светочувствительном слое фотоматериалов содержится до 40...60% *AgHal*.

Подложкой для различных фотоматериалов могут служить стеклянные пластинки толщиной 0,8...5 мм (и более), гибкие полимерные пленки из триацетата целлюлозы толщиной 60-220 мкм или полиэтилентерефталата толщиной 25...175 мкм.

Для придания фотоматериалам высоких физико-механических, противоореольных, антистатических и др. свойств на подложку и светочувствительные слои обычно наносят вспомогательные и дополнительные слои: подслой, защитный, противоореольный, противоскручивающий, антистатический, фильтровый, промежуточный, восковый и др. Подслой — вспомогательный слой толщиной 0,5...1 мкм, нанесенный на подложку в целях обеспечения прочного сцепления (адгезии) светочувствительного слоя с подложкой. Подслой для фотопленок содержит коллоидный раствор желатина в воде, органический растворитель, подрастворяющий полимер подложки, и органическую кислоту, стабилизирующую коллоидный раствор желатина. Подслой для фотопластинок содержит, кроме того, жидкое стекло.

Защитный слой представляет собой слой сильно задубленного желатина с добавкой синтетического полимера (например, латекса) толщиной 0,5...1,5 мкм. Он наносится на поверхность эмульсионного слоя фотопленки и предохраняет его от механических повреждений и воздействия окружающей среды.

Для уменьшения ореолов отражения в негативных фотопленках и фотопластинках под светочувствительный слой или на обратную сторону подложки наносят противоореольный лаковый или желатиновый слой, содержащий пленкообразующее вещество и краситель или пигмент (например, сажу), которые обесцвечиваются или вымываются в процессе обработки фотоматериалов, иначе они сделают фотошаблон непрозрачным. Желатиновый противоореольный слой, нанесенный на обратную сторону подложки, служит также и противоскручивающим слоем.

Противоскручивающий слой (контрслой) — лаковый слой из синтетических полимеров, наносимый на обратную сторону подложки для улучшения плоскостности пленки, а в ряде случаев и для придания пленке глянца и улучшения антистатических свойств.

Антистатический слой — вспомогательный слой толщиной 0,5...1 мкм; представляет собой слои полимеров с добавками электролитов, электропроводящих наполнителей (высокодисперсные сажа, графит и др.), ПАВ и другие соединения, способных поглощать из воздуха заряженные частицы, нейтрализующие заряд фотоматериалов, или влагу, повышающую его поверхностную проводимость.

Фильтровый слой служит для поглощения нежелательных лучей света, действующих на лежащие под ним светочувствительные слои.

При хранении фотоматериалов наблюдается их старение, заключающееся в уменьшении светочувствительности и увеличении плотности вуали. Каждый вид фотоматериалов характеризуется гарантийным сроком хранения, в течение которого может наблюдаться падение чувствительности и рост вуали, что необходимо учитывать при экспонировании и обработке. Чем выше светочувствительность фотоматериала, тем меньше срок их хранения. Фотоматериалы необходимо хранить в оригинальной заводской упаковке при пониженной температуре, не превышающей 18 °С, и относительной влажности 40...60%. Они должны быть защищены от воздействия агрессивных газов, рентгеновского и радиоактивного излучения, механических повреждений. Для длительного хранения черно-белых фотоматериалов рекомендуется температура 4...5 °С.

Собственная спектральная чувствительность галогенидов серебра имеет максимум на длине волны 545 нм и приемлема только для коротковолнового излучения с длиной волны, меньшей 520 нм.

Применение сенсibilизирующих красителей позволяет создать фотоматериалы, чувствительные ко всей видимой и ближней ИК области спектра с длиной волны до 1500 нм. В зависимости от спектральной чувствительности фотоматериалы делят на несенсибилизированные (обычно позитивные и рентгенографические) — чувствительные к синим и более коротким лучам света и жесткому излучению; ортохроматические и изоортохроматические — чувствительные к синим и желто-зеленым лучам; панхроматические и изо-панхроматические — чувствительные ко всему видимому спектру; инфрахроматические — чувствительные к синим лучам и ИК излучению (рис. 4.3).

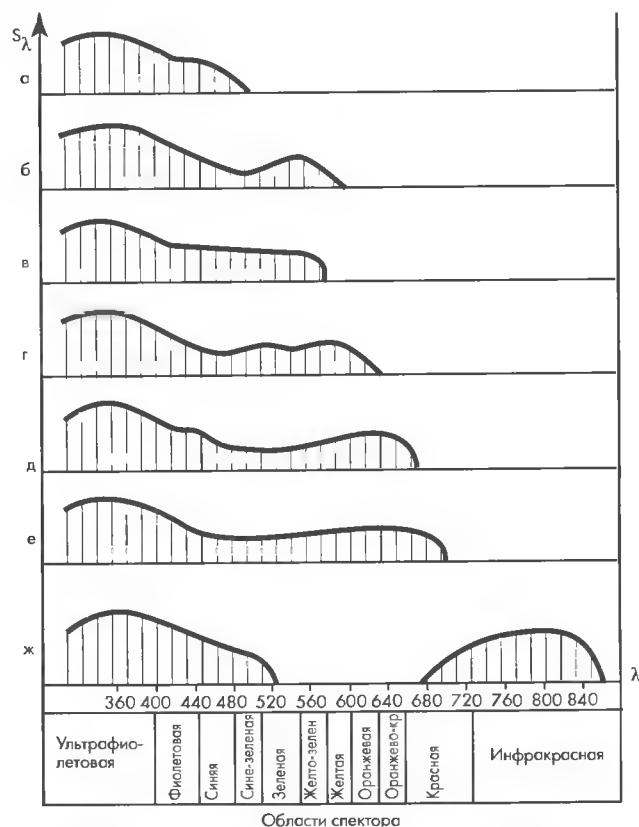


Рис. 4.3. Спектральная чувствительность фотоматериалов

Поскольку для изготовления фотошаблонов в последнее время используют лазерные фотоплоттеры, спектральную чувствительность фотопленок приспособляют к излучению соответствующего лазера (например, табл. 4.1)

Таблица 4.1. Спектральная чувствительность фотопленок для лазерных фотоплоттеров

Тип лазера	Спектральная чувствительность фотоэмульсии, нм	Неактивное освещение
Гелий-неоновый	633...670	Сине-зеленое
Полупроводниковый красный	670	Зеленое
Аргон голубой	488	Красное
Аргон, ИАГ зелено-голубой	488...565	Красное
Гелий-неон зеленый	488...543	Красное

Во время экспозиции кристаллы поглощают фотон света, его энергия используется для формирования металлического серебра на светочувствительном центре.

Абсорбция большого количества фотонов приводит к большому восстановлению металлического серебра. Когда число атомов металлического серебра достигнет от 4 до 10, кристалл фиксирует латентное (скрытое) изображение. Это такое латентное изображение, которое при проявлении восстанавливает металлическое серебро во всем объеме кристалла. Размер экспозиции фотопленки должен быть таким, чтобы достичь оптимальных результатов. Если оригинал — негатив или фотопленка экспонируется на фотоплоттере, большие экспозиции будут прибавлять ширину линии и уменьшать ширину пробельных мест. Наоборот, маленькие экспозиции уменьшат линии и их оптическую плотность.

После экспозиции фотопленка должна быть проявлена. Это четырехступенчатая процедура, обычная в фото процессах. Для иллюстрации показана последовательность процессов. Экспонированные кристаллы проявляют свое латентное изображение.

Первый процесс называется проявлением (рис. 4.4). Здесь экспонированные кристаллы галлоидного серебра преобразуются в металлическое серебро. Скрытое изображение действует как

катализатор в реакции восстановления, так что обеспечивается разница между экспонированными и не экспонированными кристаллами. Однажды начавшийся процесс преобразования кристалла заканчивается эффектом с усилением изображения более чем в 10 млн. раз.



Рис. 4.4. Активация кристаллов AgHal при освещении: а) частичное восстановление металлического серебра из AgHal , б) образование скрытого изображения.

Проявление фотопленки должно обеспечить оптимальные результаты. Перепроявление делает линии широкими с расплывчатыми краями. Это также приводит к образованию плотной вуали на пробельных местах. Недопроявление создаст тонкие линии и низкую оптическую плотность изображений. Обычно процесс проявления контролируется предназначенным для этого процессором.

Теперь можно увидеть проявленное изображение, образованное металлическим серебром. Неэкспонированные кристаллы, не активированные светом, не восстановлены до металлического серебра в процессе проявления (рис. 4.5).

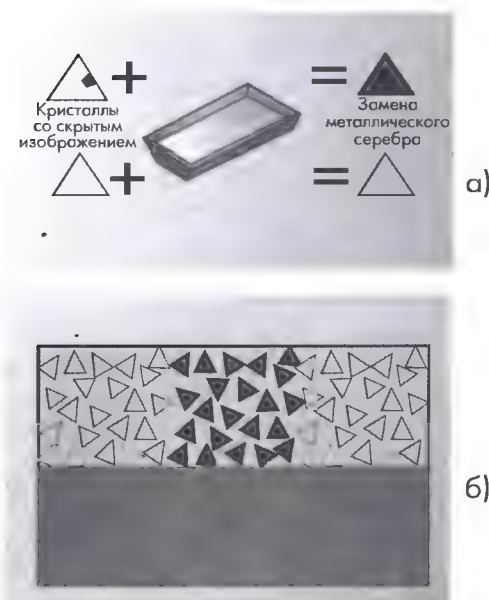


Рис. 4.5. Проявление скрытого изображения: а) восстановление металлического серебра в активированных светом кристаллах и отсутствие процессов восстановления в неэкспонированных частях, б) восстановление конгломерата кристаллов в объеме фотоэмульсии при проявлении.

Но это изображение еще не устойчиво. Чтобы сделать изображение устойчивым, фотопленка должна подвергнуться процессу фиксирования, при котором из фотоэмульсии удаляются кристаллы галлоидного серебра (рис. 4.6). В процессе обработки в фиксирующем растворе тиосульфат аммония превращает эти кристаллы в несколько растворимых солей, которые удаляются из эмульсии. Рисунок из металлического серебра не затрагивается на этой стадии. Фиксирование — не критическая операция. Невозможно передержать фотопленку в фиксирующем растворе. Правда, попадают пленки, у которых при передержке светлые области приобретают серый оттенок. При недостаточной выдержке или обедненном растворе фиксажа фотопленка при выходе из процессора может демонстрировать молочно-белые оттенки там, где она должна быть чистой.



Проясним эту ситуацию. При изготовлении фотошаблона проявление — процесс, при котором начатые при экспозиции химические изменения усиливаются и расширяются. При экспонировании сухого пленочного фоторезиста химический процесс завершается при экспозиции, и после нее не требуется дополнительная обработка для химических превращений. Когда технологи говорят о проявлении фоторезиста, они подразумевают его селективное удаление с заготовки платы. Это аналогично фиксации изображения на серебросодержащих фотоматериалах, когда из эмульсии удаляют неэкспонированное галлоидное серебро.

Итак, в результате операции фиксирования металлическое серебро остается в местах, где оно было экспонировано. Неэкспонированное галлоидное серебро, преобразованное в растворимые соединения, уходит из желатинового слоя в раствор. Поскольку этот процесс диффузионный, для него требуется время.

После проявления и фиксации, фотошаблон должен быть хорошо промыт для удаления побочных химических продуктов. Если они все же останутся, при сушке они проявят себя в виде многочисленных кристаллов, которые могут разрушить желатиновый слой, сделать его недостаточно прозрачным.

Завершающий процесс — сушка, в процессе которой испаряется вода. Очевидно, что желатиновый слой, который начал набухать уже при первом погружении в проявитель, и при увлажнении будет увеличиваться примерно на одну десятую своего размера. Полиэфирная основа будет также увеличивать свои размеры при мокрой обработке в результате абсорбции влаги. В результате происходят некоторые изменения размеров фотошаблонов.

4.1.3. Диазопленки

В диазографии (диазотипии, светокопировании) изображение оригинала получают под действием света на светочувствительный материал, содержащий диазосоединение.

Регистрирующий материал состоит из подложки, покрытой слоем, чувствительным к излучению УФ и сине-фиолетовой зонам спектра. Различают диазографические материалы с одно-, двух- и трехкомпонентным светочувствительным слоем. Однокомпонентный слой содержит соль диазония, диспергированную в связующем из легкоплавкого полимера, например смесь поливинилового спирта с поливинилацетатом или сополимер метилвинилового эфира

с малеиновым ангидридом. Двухкомпонентный слой кроме соли диазония содержит азокомпоненту (резорцин, фтороглюцин, ароматический амин, динатриевую соль 6-гидрокси-2-нафталинсульфоновой кислоты). Трехкомпонентный слой дополнительно содержит соединения, выделяющие при нагревании до 100...120 °С вещества основного характера, например, мочевины или ее производные.

На экспонированных участках соль диазония разлагается и теряет способность к реакции азосочетания. На участках, не подвергнутых действию света, из соли диазония и азокомпоненты при проявлении образуется азокраситель, цвет которого зависит от строения его радикалов. Обработка, необходимая для получения красителя, в зависимости от вида светочувствительного слоя может быть мокрой — с применением раствора азокомпоненты (для однокомпонентных слоев), сухой — в парах аммиака (для двухкомпонентных) или термической (для трехкомпонентных).

Время получения изображения 1...3 с. Светочувствительность диазографических пленок 5 см²/Дж, разрешающая способность 100 мм⁻¹, коэффициент контрастности 3-4.

Диазографические пленки используются главным образом для размножения микроформ и, в частности, для изготовления рабочих фотошаблонов печатных плат.

Диазопленки обладают такими свойствами, которые хорошо согласуются с требованиями к фотошаблонам, в частности для визуального совмещения. Фотошаблоны из диазопленки имеют прозрачное желтое изображение, позволяющее легко совмещать его со сверленными отверстиями. Это изображение не прозрачно для ультрафиолетового света, к которому чувствителен фоторезист. Мало того, поскольку изображение находится не в желатине, используемом в серебросодержащих фотопленках, поверхность фотошаблонов из диазопленки устойчива к истиранию, что очень нужно при многократном использовании фотошаблонов в процессах экспонирования.

Структура диазопленки, используемой для фотошаблонов несколько похожа на структуру серебросодержащих фотопленок, но по химическому содержанию это другой материал. Это отличие заключается в светочувствительном слое, в котором формируется изображение. Этот слой содержит четыре главных составляющих диспергированных компонента в акриловом связующем:

- светочувствительная соль диазония,

- красящие компоненты, которые реагируют с диазнием во время проявления для формирования рисунка,
- стабилизатор, предотвращающий преждевременную реакцию диазония и красящих компонентов,
- рельефообразователь (для соответствующего типа материала с рельефом для ускорения вакуумирования в раме экспонирования).

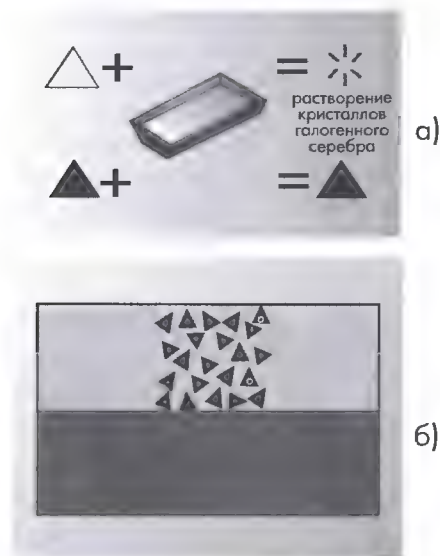


Рис. 4.6. Удаление неэкспонированных кристаллов AgHal — процесс фиксирования: а) растворение AgHal , б) удаление AgHal из фотоэмульсии.

Подслои, используемый в диазопленках, отличается от того, что используется в серебряносодержащих материалах, но назначение его то же: обеспечить адгезию активного слоя с основанием. Как и в серебряносодержащих материалах, в качестве пленочного основания используется большей частью полиэфир, обеспечивающий необходимые прочность, гибкость, долговечность и размерную устойчивость. Антистатическое покрытие обратной стороны предотвращает налипание пыли и загрязнения, вызванное статическим электричеством. Когда основание имеет толщину 175 мкм , общая толщина составляет 180 мкм .

Светочувствительный компонент в диазопленке — соль диазония. Это органическая молекула размером примерно $1,5 \text{ нм}$, которая содержит два связанных атома азота. На экспонированных участках соль диазония разлагается и теряет способность к реакции азосочетания. На участках, не подвергнутых действию света, из соли диазона и азокомпоненты при проявлении образуется азокраситель, например, $\text{ArN}_2\text{X} + \text{Ar}_2\text{OH} \rightarrow \text{ArNP} + \text{Ar}_2\text{OH} + \text{HX}$, цвет которого зависит от строения радикалов Ar и Ar_2 . Обработка, необходимая для получения красителя, — сухая, в парах аммиака. Время получения изображения $1...3 \text{ с}$. Светочувствительность диазографических пленок $5 \text{ см}^2/\text{Дж}$, разрешающая способность 100 мм^{-1} , коэффициент контрастности $3...4$.

Как было сказано ранее, диазопленка — позитивно работающая система: там, где пленка освещалась, не будет зачернения изображения. Когда экспонирование производят в области, близкой к ультрафиолетовой, диазомолекулы разлагаются на два неактивных бесцветных компонента. Величина экспозиции также важна, как и для серебряносодержащих фотопленок, но эффект от неправильно выбранной экспозиции другой. Если оригинал — негатив, большая экспозиция увеличивает ширину линии (цветную область), пробельные элементы уменьшаются. При меньшей экспозиции уменьшаются линии (цветные области) и плотность цвета.

Чтобы правильно установить экспозицию, диазопленку экспонируют через оригинал, содержащий 21-ступенчатую шкалу плотностей. Когда экспозиция установлена по наиболее хорошо воспроизведенному окну шкалы плотностей, к ней немного прибавляют выдержку, чтобы уверенно воспроизвести тонкие линии.

Во время проявления пленка подогревается и обрабатывается в парах аммиака $(\text{NH}_4)\text{OH}$. Аммоний разрушает защиту в светочувствительном слое и приводит диазо-соль к реакции окрашивания двух составляющих.

Одна составляющая поглощает голубые лучи и образует желтое визуальное прозрачное изображение. Другая тоже визуальное прозрачная, но непрозрачная для УФ-лучей, используемых для экспонирования фоторезистов.

Для проявления используется специальный процессор, в котором для проявления используется $(\text{NH}_4)\text{OH}$. Температура поддерживается в диапазоне $60...70^\circ\text{C}$. Большая температура приводит к повышенной деформации полиэфирной основы.

После проявления формируется окрашенное изображение на неэкспонированных участках и прозрачное — в области экспонирования.

Не требуется больше никаких обработок. Диазопленки трудно перепроявить. Однако, недопроявление уменьшает оптическую плотность фотошаблонов.

4.1.4. Фотопленки для изготовления фотошаблонов

4.1.4.1. Общие сведения

Для изготовления фотошаблонов предназначены фототехнические черно-белые пленки и пластинки для репродукционных и копировальных работ в полиграфии. Фотопленки изготавливаются на полиэтилентерефталатной (толщина 65...175 мкм) или триацетатцеллюлозной (100...200 мкм) подложках.

Фотопленки для фотошаблонов печатных плат содержат:

- полимерную основу,
- фоточувствительный слой эмульсии,
- дополнительные вспомогательные слои поддержки

Для обеспечения размерной стабильности и удобства автоматического управления процессами экспонирования фотопленки для фотошаблонов изготавливаются на толстой полиэфирной основе. Толщина такой фотопленки, как правило, — 175 мкм. Толщина эмульсии и вспомогательных слоев — приблизительно 5 мкм. Некоторые фотопленки не имеют желатинового слоя поддержки, что уменьшает влияние относительной влажности на изменение их линейных размеров.

Для фотошаблонов очень важно обеспечить размерную стабильность в условиях изменяющихся температуры и влажности. Для этого после полива или экструзии пленку подвергают циклическому нагреву, в результате чего она ускоренно релаксирует и из ее объема выпариваются остатки растворителей. В результате снимаются внутренние напряжения и улучшается размерная стабильность.

4.1.4.2. Влияние влажности

При изменении влажности внешней среды полиэфирная основа фотопленок приобретает равновесную влажность и меняет свои размеры. Чтобы на 90% достигнуть равновесия с внешней средой (время релаксации) для пленки толщиной 175 мкм требуется порядка 4 ч. Коэффициент линейного расширения при изменении относительной влажности полиэфирной пленки — 0,0008 % на 1 % относитель-

ной влажности. Этот коэффициент — не зависит от толщины пленки, но желатиновые и вспомогательные слои ощутимо влияют на изменение размеров основы, а значит и фотопленки. Причем желатин поглощает влажность очень быстро. Требуется меньше трех минут для слоя желатина, чтобы он достиг 99 % равновесия с окружающей средой. Поэтому, чем толще пленка основы, тем меньший вклад имеют наслоения, и фотопленка получается стабильнее в размерах.

Процессы поглощения влаги основой и слоями желатина являются полностью обратимым: эффекты гистерезиса незначительны.

4.1.4.3. Влияние температуры

Фотопленка расширяется при повышении температуры окружающего воздуха и сжимается при понижении температуры.

Температурный коэффициент расширения полиэфирной основы — 0,0018 % на 1 °С. Температурный коэффициент расширения не зависит от толщины материала.

Реакция фотопленки на изменение температуры проявляется очень быстро.

Фотопленка адаптируется к окружающей температуре в течение 2...3 минут.

Расширение и уменьшение фотопленки при изменении температуры — обратимый процесс. Однако, если фотопленку нагреть до 60°С, произойдет необратимое изменение ее размеров.

4.1.4.4. Влияние режимов обработки

В результате мокрой обработки фотопленки (проявление фиксаж, отмывка) и последующей сушки происходит изменение ее размеров. Особенно существенно влияет температура сушки так, что фотопленки, которые сушатся при высоких температурах, будут иметь увеличенные размеры и наоборот. Изменение размеров фотопленок толщиной 175 мкм может составлять $\pm 0,02$ %. Однако, фотопленка, которая была высушена при оптимальной температуре, может изменить свои размеры очень незначительно. Мало того, существует оптимальная температура сушки, при которой это изменение размеров может сводить к нулю. Эта температура устанавливается для каждого типа фотопленки. Величина оптимальной температуры сушки в основном зависит от относительной влажности окружаю-

шей среды и относительной влажности воздуха в сушильной камере проявочной машины. Поэтому идеальная температура сушки должна быть определена исходя из относительной влажности воздуха в помещении для обработки фотопленки. Например, фирма Кодак дает такие рекомендации:

Влажность воздуха	Температура сушки
40%	27 – 32°C
40%	41 – 46°C
50%	32 – 38°C
50%	43 – 49°C
60%	35 – 41°C
60%	46 – 54°C

4.1.4.5. Старение

Размер фотопленок изменяется из-за старения основы, но величина этих изменений является очень незначительной. Полиэфирная основа может изменить размеры в пределах $\pm 0,01\%$ за 5...10 лет.

Изменения линейных размеров зависят от влажности и температуры хранения фотопленок. Хранение при высокой влажности, вероятно, повлечет за собой увеличение размеров фотошаблона и наоборот.

4.1.4.6. Размерная стабильность

Фотопленки для фотошаблонов печатных плат с позиций размерной стабильности могут быть сгруппированы в два класса: фотопленки, которые не имеют вспомогательных слоев и фотопленки, которые его имеют (на желатиновой основе).

Коэффициент влажности: изменение размеров % на 1 % влажности		Температурный коэффициент: % изменения длины на 1 °C
вдоль	поперек	
Фотопленки без вспомогательных слоев на основе желатина		
0,011	0,009	0,018 % на 1°C
Фотопленки с вспомогательными слоями на основе желатина		
0,013...0,017	0,011...0,015	0,018 % на 1°C

4.1.4.7. Методика измерений

Изменение размеров от изменения влажности приводится обычно для диапазона влажности от 15 до 50 % при температуре 21°C. Эта процедура относительно сложна, так как изменение размеров не линейно по отношению к изменению влажности. Это важно, поскольку измерения в разных диапазонах влажности могут иметь отличия. Можно в качестве примера привести значения коэффициент линейного расширения при изменении влажности, измеренные при низкой, средней и высокой влажности:

Низкая влажность:

от 15 до 50 % 0.0014

Средняя влажность:

от 30 до 60 % 0.0012

Высокая влажность:

от 50 до 80 % 0.0010

Поэтому при сравнении поведения различных фотопленок от изменения влажности важно знать диапазон абсолютного изменения влажности, при котором он определялся.

То же самое относится и к температуре. Показанные в таблицах коэффициенты определены в диапазоне температур между 21°C и 49°C (70°F и 120°F) и относительной влажности 20%. Температурный коэффициент всех фотопленок на полиэфирной основе практически одинаков, независимо от её толщины.

4.1.4.8. Эффект «Серебряного слоя»

Количество серебра в слое фотоэмульсии может влиять на изменение размера фотопленки. Негативы, имеющие высокое отношение непрозрачной (серебросодержащей) области к прозрачной, будут иметь меньшие изменения линейных размеров, чем позитивы того же изображения. Высокое содержание серебра стабилизирует желатиновый слой. И хотя значение этого эффекта очень мала — во втором знаке температурного коэффициента изменения размеров, с ним приходится считаться.

4.1.4.9. Время релаксации фотопленки

Время, требуемое, чтобы достигнуть равновесия с влажностью в помещении зависит от толщины фотопленки. Требуется один час на 25 мкм толщины фотопленки, чтобы достигнуть равновесия по относительной влажности с окружающей средой:

Релаксация фотопленки к условиям влажности окружающей среды	Время релаксации (час)	
	для фотопленки с основой 100 мкм	для фотопленки с основой 175 мкм
50 %	1 час	0.4 часов
75 %	2 часа	1 час
90 %	4 часа	2 часа
99 %	7 часов	4 часа

Фотопленка адаптируется к окружающей температуре в пределах от 1 до 3 минут.

4.1.4.10. Неравномерность свойств фотопленок в X и Y направлениях

Основы фотопленок изготавливают поливом на движущуюся ленту. Поэтому их свойства должны быть неодинаковыми вдоль и поперек полива. В последующем пленка подвергается всевозможным обработкам, чтобы предотвратить эту анизотропность. Совершенно идеальная основа фотопленки будет иметь идентичные свойства в X, Y, и диагональных направлениях в пределах всего листа. Тем не менее, большие листы фотопленки могут иметь различные изменения размеров в X и Y направлениях, с разницей в пределах $\pm 10\%$.

4.1.4.11. Гистерезис

Гистерезис — это необратимое изменение размера фотопленки при изменении относительной влажности окружающей среды, зависящий и от направления изменения влажности. Этот эффект означает, что фотопленка не будет полностью возвращаться к первоначальному размеру, и это зависит от того, как изменяется относительная влажность (увеличивается или понижается).

Эффект гистерезиса для современных типов фотопленок на толстой полиэфирной основе мало заметен: меньше чем 10 % любого изменения размера. Для новых типов фотопленок эффект гистерезиса ещё меньше и поэтому практически не учитывается.

4.1.4.12. Подготовка фотошаблонов к работе

Общие рекомендации: пленочные фотошаблоны должны быть выдержаны от 4 до 7 часов в условиях рабочего помещения (т.е. рядом с установкой контактной печати или фотоплоттером).

Необходимо поддерживать постоянную температуру ($\pm 1^\circ\text{C}$) и влажность ($55 \pm 5\%$) во всех помещениях, где используются фотошаблоны.

Фотопленка должна быть предварительно адаптирована к условиям её эксплуатации (режимам работы) в течение, по крайней мере, 4 часов (адаптация по влажности на 90%) или 7 часов (99%).

Необходимо стандартизировать температуру сушки фотопленки в проявочной машине в зависимости от влажности в помещении. Более точная температура сушки должна быть установлена опытным путем.

Целесообразно определить время адаптации фотопленки после её обработки в проявочной машине, измеряя через 5-минутные интервалы размер между реперными точками до момента его стабилизации.

4.1.4.13. Создание условий вакуумной гигиены в рабочих помещениях — «чистые» комнаты

Дверь в помещение, предусмотренное для работы с фотопленкой, должна плотно закрываться и, по возможности, иметь снаружи «темный» тамбур. Светофильтр для неактивного освещения должен быть корректно выбран и установлен в соответствие с документацией на используемую фотопленку. Необходимо контролировать помещение на содержание пыли и периодически делать «влажную» уборку.

На поверхностях стоек и полок, предназначенных для работы с фотопленкой, должны быть устранены любые заусенцы и неровности, которые могли бы поцарапать эмульсию фотопленки.

Пакет фотопленки (обычно 100 листов) может требовать сотен часов для полной релаксации к климатическим условиям «чистой» комнаты. Практически невозможно достичь необходимого результата, оставив фотопленку в пакете. Поэтому перед использованием необходимо разделить общий пакет фотопленки на отдельные листы для достижения скорейшей релаксации размеров фотопленок к влажности в помещении.

4.1.4.14. Пример расчета изменения размеров фотопленки

Коэффициент изменения размеров от изменения влажности: 0,0009 % на 1 % относительной влажности.

Температурный коэффициент: 0,0018 % на 1°C.

Изменение размера = Первоначальный размер $\times$ (0,0009/100) $\times$ $\times$ Изменение влажности в % + Первоначальный размер $\times$ (0,0018/100) $\times$ $\times$ Изменение температуры в °C

Пример №1

Размер фотопленки: 500 мм

Изменение влажности в % : увеличение на 4 %

Изменение температуры в °C: уменьшение на 2°C

Изменение размера = (500 мм $\times$ 0,0009/100 $\times$ 4) + (500 мм $\times$ 0,0018/100 $\times$ (- 2)) = 0,018 мм + (-0.018 мм) = 0 (без изменения)

Пример №2

Размер фотопленки: 500 мм

Изменение влажности в %: увеличение на 4 %

Изменение температуры в °C: увеличение на 2°C

Изменение размера = (500 мм $\times$ 0,0009/100 $\times$ 4) + (500 мм $\times$ 0,0018/100 $\times$ 2) = 0,018 мм + 0,018 мм = 0.036 мм

4.1.5. Фотостекла

Основы из стекла не подвержены влиянию влажности. Стабильность их размеров зависит только от изменений температуры, но и при этом их температурный коэффициент расширения гораздо меньше, чем у других материалов:

Наименование	Температурный коэффициент, % на 1°C	Коэффициент изменения от влажности, % на 1% ОВ
Кварц	0,00005	0
Стекло	0,00080	0
Полиэфирная пленка («Майлар»)	0,00180	0,0009
Триацетатцеллюлозная пленка	0,00270	0,0023
Полихлорвиниловая пленка («Астралон»)	0,00650	0,0018

Примеси оксидов железа, неизбежно присутствующие в стекле, делают его непрозрачным в ультрафиолетовой области спектра, в которой должны работать фотошаблоны. Высокой прозрачностью для ультрафиолетовых лучей обладают кварцевое стекло, а также специальные увиолевые стекла на основе B_2O_3 , P_2O_5 .

Стеклянные фотошаблоны должны обладать хорошей плоскостностью, поэтому стеклянные пластины после отливки шлифуют и полируют. Чтобы придать им прочность их делают относительно толстыми (до 6 мм). От этого они становятся тяжелыми и неудобными для ручной загрузки светокопировальных рам.

При использовании системы совмещения типа PIN-LAM в стекле высверливались окна для размещения в них втулок. Во втулках с большой точностью по диаметру и межцентровым расстояниям высверливались отверстия для входа штифтов системы базирования. Большие технические трудности представляло совмещение системы координат координатографа и сформированной на стекле системы баз. При использовании системы MASS-LAM необходимость в базовых отверстиях отсутствует. И это открывает прямую дорогу к использованию стеклянных фотошаблонов. Остается еще одна проблема: стеклянные фотошаблоны могут изготавливаться только на координатографах (низкая производительность) или планшетных фотоплоттерах (дорогое оборудование). Но если и эта проблема будет преодолена, стеклянные фотошаблоны станут преобладающим носителем топологии при изготовлении плат по высоким проектным нормам.

4.2. Принципы прорисовки фотошаблонов

4.2.1. Методы ручной работы

Конечно, эти методы относятся к истории, но чтобы понять значительность достижений последнего времени, стоит хотя бы перечислить методы ручного изготовления фотооригиналов, из которых потом методом репродукции изготавливались рабочие фотошаблоны.

4.2.1.1. Вычерчивание

Автор еще застал этот метод, по которому большие коллективы работников, получившие хорошие навыки в картографии, вычерчивали на ватмане гуашью топологию печатных плат. В основном использовались следующие средства работы:

- вручную — с помощью простых чертежных документов и приспособлений, на основе с предварительно нанесенной координатной сеткой, с помощью точных шаблонов;
- вычерчивание на координатографе, управляемом вручную.

Применение координатографов, которые с давних пор использовались в картографии, намного увеличило точность изготовления фотооригиналов.

4.2.1.2. Метод аппликации примагничивающимися элементами

На стальную пластину, покрашенную в белый цвет, укладывали шаблоны элементов рисунка, изготовленные из магнитной резины. Для точного позиционирования элементов пластина имела отверстия, высверленные с большой точностью на координатно-сверлильном станке. Для упрощения работы оператора на стальную пластину проецировали эскиз печатной платы, предварительно нарисованный на миллиметровке.

4.2.1.3. Аппликация липкой лентой

В этом случае рисунок печатной платы выполняется цветной липкой лентой. Элементы рисунка наклеиваются непосредственно на безусадочную основу с нанесенной координатной сеткой. Наклеиванием липкой лентой получали рисунок с хорошей резкостью кон-

туров. При изготовлении фотошаблонов двусторонних печатных плат для одной стороны платы использовали один цвет (например, красный), для обратной — другой (например, синий). При репродукции через соответствующие светофильтры получали комплект из двух фотошаблонов. Этот же метод использовали для нанесения рисунка непосредственно на фольгу диэлектрика для защиты от травления.

Целый ряд фирм специализировался на производстве и поставках наборов для аппликации. В последующие времена они пользовались большим успехом в лабораторной практике.

4.2.1.4. Метод скрайбирования двухслойной пленки

Основу этого метода создает двухслойная пленка. Базовый слой — безусадочная синтетическая пленка или стекло. Покровный слой — полупрозрачная пленка красного цвета, которая при репродукции воспроизводится в черном цвете. Для изготовления оригинала специальным резцом вырезается по контуру и отделяется от основания пленка покровного материала. Этот метод чаще использовался в изготовлении фотооригиналов для изготовления микросхем и оттуда временно перешел в производство печатных плат. Метод отличался высокой точностью воспроизведения рисунка.

4.2.1.5. Резание по эмали

Полированное стекло покрывается непрозрачным слоем эмали. Вырезание рисунка производится на точном координатографе с ручным приводом головки. Расстановка контактных площадок производится оператором по таблице координат с точностью $\pm(0,2...0,5)$ мм. При репродукции с уменьшением обеспечивается точность позиционирования не хуже ± 10 мкм.

4.2.2. Автоматические методы изготовления фотошаблонов

Установились два принципа прорисовки рисунка печатной платы: векторный и растровый. И хотя в последнее время предпочтение отдается растровому методу, используемому в фотоплоттерах, необходимо хотя бы упомянуть и векторный метод, занявший значительный период развития технологий печатных плат.

4.2.2.1. Векторный метод вычерчивания изображений

Машины, в которых используются векторные принципы прочерчивания рисунка на координатных столах, принято называть координатографами. На одних из них работы могут выполняться вручную (см. п.п. 4.2.1.4 и 4.2.1.5), на других — в автоматических режимах. В автоматических координатографах в большинстве случаев для прорисовки фотошаблонов используется световой луч, экспонирующий фотоматериал. Для формирования светового пятна заданной формы используются соответствующие апертуры, которые размещаются на стеклянной планке или диске. При прорисовке программно управляемый механизм выставляет необходимую в данном случае апертуру: контактную площадку той или другой формы, круговое или квадратное пятно определенного диаметра для прорисовки проводников и т.д. (рис. 4.7).

Большая часть времени работы координатографа занимает прорисовка проводников. Для этого координатный стол с управляемым приводом движется в системе координат $X-Y$, включающийся при движении световой луч через апертуру засвечивает фотопленку (рис. 4.8). Скорость движения луча — порядка 0,2 м/с, скорость смены апертуры (символов) — 0,5 с. Однако на самом деле время прорисовки определяется ускорением разгона и замедления координатного стола. А это зависит от мощности привода. Реально средняя скорость перемещения луча при прорисовке проводников — 0,1 м/с. При экспонировании контактных площадок стол постоянно работает в режиме «старт-стоп», т.е. он вынужден разгоняться и при подходе к позиции контактной площадки замедляться. В общей сложности на пропечатку контактных площадок уходит порядка по 2 с на позицию. Если учесть, что суммарная длина проводников в МПП средней сложности составляет 100 м, а число контактных площадок примерно 1000, и они повторяют

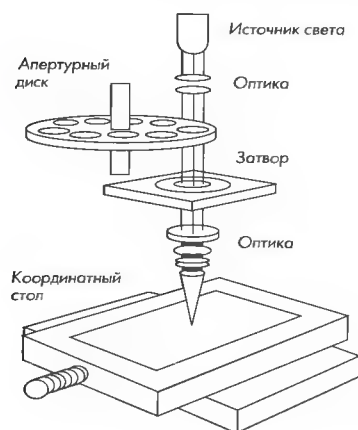


Рис. 4.7. Принцип работы фотокоординатографа

но на противоположном наружном слое, чистое время прорисовки проводников не может быть меньше одного часа. Если учесть еще и время смены заданий при переходе от одного слоя к другому, общее время изготовления комплекта фотошаблонов МПП на координатографе превышает два часа.

Поскольку движение стола полностью соответствует направлениям проводников, такой принцип прорисовки называют векторным.

Погрешности прорисовки фотошаблонов на координатографах складываются из погрешностей позиционирования координатного стола и погрешностей позиционирования световых пятен от апертур на планках или дисках. Когда эти погрешности сведены к минимуму, можно ожидать погрешности координатографов в пределах $\pm 10...12$ мкм.

4.2.2.2. Наборный принцип

Фотонаборные автоматы (ФНА) — это поколение высокопроизводительных среднеформатных фотовыводных устройств. Они работают по принципу поочередной фотопечати элементов рисунка. Они также как и в фотокоординатографах имеют источник света и апертуры, соответствующие различным элементам рисунка. На рис. 4.9 показан принцип

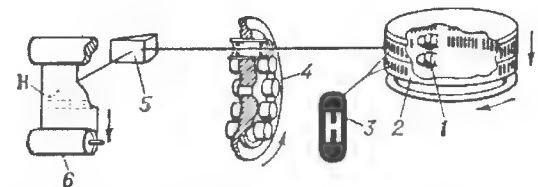


Рис. 4.9. Принцип работы фотонаборного автомата: 1 — источники света, 2 — барабан с набором символов, 3 — две строки символов на барабане и символ «Н», 4 — объективы с различным увеличением, 5 — зеркало, направляющее луч к фотоносителю, 6 — фотоноситель. в данном случае рулонная фотопленка.

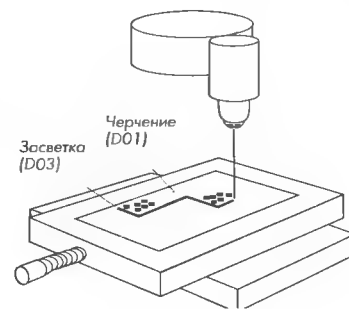


Рис. 4.8. Засветка элементов и черчение линий рисунка

цип действия фотонаборного автомата применительно к полиграфическому производству, где они активно используются. На рисунке показано для примера воспроизведение символа «Н», но им может быть любой элемент рисунка печатной платы. Время смены символов порядка 0,1...0,2 с. Поскольку наборный принцип означает поочередное экспонирование элементов рисунка, то проводник прорисовывается как последовательность пошаговых экспонирований элементов проводника. Поэтому производительность фотонаборных автоматов при изготовлении фотошаблонов печатных плат очень низка.

Фотонаборные автоматы плохо приспособляются к производству фотошаблонов. Тем не менее, их применение в производстве печатных плат не исключено.

4.2.2.3. Растровый принцип

По способу печати растровые графопостроители подразделяются на:

- электростатические графопостроители (electrostatic plotter) с электростатическим принципом воспроизведения изображения на специальных носителях;

- струйные графопостроители (ink-jet plotter), основанными на принципе струйной печати (выдавливании красящего вещества через сопла форсунок за счет термоудара или динамического удара пьезоэлементом);

- лазерные графопостроители (laser plotter), воспроизводящие изображение с использованием луча лазера на промежуточном носителе с последующим переносом на бумагу;

- светодиодные графопостроители (LED-plotter), отличающиеся от лазерных способом формирования изображения для переноса его с барабана на бумагу;

- термические графопостроители (thermal plotter);

- фотоплоттеры (photo plotter) с фиксацией изображения на светочувствительном материале.

Мы будем рассматривать растровые фотоплоттеры применительно к процессам фотолитографии, используемым в технологиях печатных плат.

Растровый принцип формирования изображений полностью подобен воспроизведению рисунка на экранах мониторов: телевизоров, компьютеров и т.д. Построчно бегающий луч модулируется

по яркости, поэтому на изображении появляются светлые и темные элементы.

Растровый метод записи изображений одинаково легко воспроизводит любые элементы рисунка: позитивные и негативные, прямые и зеркальные. Возможности проектирования печатных плат расширяется за счет простоты воспроизведения любых форм проводников и контактных площадок.

Построчная развертка луча может осуществляться либо за счет вращения барабана, на котором закреплена фотопленка, либо за счет вращения призмы с зеркалами, построчно, развертывающей луч на плоской поверхности, несущей фотоматериал. Поэтому фотоплоттеры могут быть двух типов: планшетные и барабанные.

Возможности использования растровых фотоплоттеров расширились с появлением лазерных источников света. Их большая энергетическая насыщенность (плотность энергии), возможность фокусировки луча в точечный размер и, главное, способность к высокоскоростному модулированию луча — все это создало условия для широкого распространения растрового принципа формирования изображений.

Размер фотошаблона определяется диаметром барабана, на котором закрепляется фотопленка и длиной пробега источника света по каретке вдоль направляющей барабана. Чтобы фотопленка плотно прилегала к плоскости барабана, его снабжают перфорацией, с помощью которой осуществляется вакуумный прижим пленки.

В качестве источника света в фотоплоттерах могут использоваться лазерные и световые, например, ксеноновые лампы. У ксеноновых ламп спектр излучения шире, чем у монохромного лазера (рис. 4.10). Поэтому в них могут использоваться обычные фотоматериалы, сенсibilизированные к видимой части света. Ксеноновая лампа имеет большой срок эксплуатации (более десяти лет при круглосуточном использовании или 10^{11} вспышек) и имеет максимальное излучение в диапазоне 400–560 нм (синий-голубой-зелёный спектр). Она излу-



Рис. 4.10. Спектр ксеноновой лампы

чают очень короткие (менее 3 микросекунд) и мощные импульсы света. Активная жидкокристаллическая матрица (LCD) модулирует свет вспышки согласно данным рисунка фотошаблона, которые по-кадрово на ней воспроизводятся при перемещении фотоголовки.

Для лазерных фотоплоттеров необходимо использовать фотоматериалы, имеющие максимальную чувствительность на длине излучения лазера: красный или зеленый или др. лазеры. Фотоматериалы с широкой спектральной чувствительностью малочувствительны в узкой полосе излучения лазера. Именно поэтому для лазерных фотоплоттеров используют специальные фотоматериалы, сенсibilизированные к соответствующей частоте (длине волны) излучения лазера.

Скорость прорисовки изображений на фотоплоттерах явно выше, чем при использовании других принципов. В первую очередь это обусловлено отсутствием режима «старт-стоп». Это значит, что при движении луча ему нет необходимости останавливаться и разгоняться, прорисовка идет построчно с постоянно высокой скоростью. Сама скорость движения луча зависит от мощности источника света и чувствительности пленки. Производительность изготовления фотошаблона связана с заданной разрешающей способностью так, что чем она выше, тем тоньше линии, тем их больше, тем большим количеством строк формируется рисунок. В табл. 4.2 показаны эти соотношения при использовании красного полупроводникового лазера и стандартной, специально предназначенной для этого лазера, фотопленки.

Таблица 4.2. Разрешение рисунка, воспроизводимого растровым способом

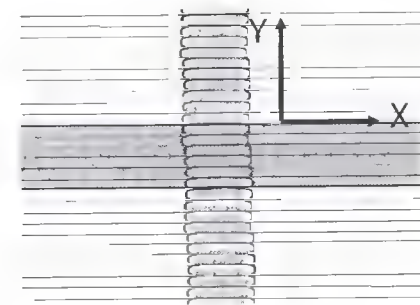
Разрешение рисунка, dpi	Размер пятна (пикселя), мкм	Минимальный размер воспроизводимой линии, мкм
2000	12,7	50
4000	6,3	25
6000	4,2	17
8000	3,2	13

Принято считать, что минимальный размер светового пятна лазера примерно равен 3...5 длинам волн когерентного источника света. Значит, если красный лазер излучает свет с длиной волны 650 нм, с его использованием можно получить четкое световое пятно размером 2...3 мкм. Если требуется получать более четкое изображение,

необходимо использовать лазерные источники света с меньшей длиной волны и соответствующие им фотоматериалы (см. табл. 4.11).

Четкость и равномерность края проводников непосредственно зависит от частоты строк растрового изображения (рис. 4.11). Волнистость края вертикального проводника — естественное явление для раstra.

С увеличением разрешения производительность фотоплоттера падает так, как ему приходится воспроизводить рисунок большим количеством строк. Для примера в табл. 4.3 показана производительность фотоплоттеров с ксеноновой лампой.



4.11. Формирование горизонтальных и вертикальных линий растровым методом

Таблица 4.3. Пример зависимости производительности растрового фотоплоттера от степени разрешения.

Разрешение, dpi	Формат рисунка, мм	Время прорисовки, мин
2000	410×560	3
4000	410×560	5
8000	410×560	9
2000	610×720	4
4000	610×720	7
8000	610×720	15

Для увеличения производительности луч источника света расщепляют и модулируют каждый из них индивидуально. Известны конструкции фотоплоттеров, в которых расщепление осуществляется на восемь лучей.

4.2.2.4. Возгонка масочного покрытия

Вместо фотоматериалов можно использовать прозрачные полиэфирные пленки с тонким (5 мкм) непрозрачным масочным по-

крытием. Для записи изображения на таких пленках используют ИК-лазер, например, волоконный лазер с активной средой на основе иттербия. Масочное покрытие в зоне облучения лазерным лучом сублимирует и удаляется в систему отсоса. Работа с такой пленкой не требует затемнения и мокрой обработки для проявления и фиксации. Фотошаблоны по этому методу получаются высококонтрастными с большой оптической плотностью (4,5 Dlog) и резкостью края. Плоттеры для работы с масочным покрытием удобно использовать непосредственно рядом с местом проектирования, получая возможность сверять задуманные проекты с полученными фотошаблонами. Отсутствие мокрых процессов позволяет избежать изменения размеров основы фотошаблонов за счет набухания и гистерезиса изменения размеров.

Примером конструкции плоттера для «сухой» технологии изготовления шаблонов — отечественный плоттер *LaserGraver*, позволяющий производить запись шаблонов с разрешением до 10160 dpi (размер пикселя 2,5 мкм). Многолетний опыт работы авторов технологии *LaserGraver* привел их к наиболее оптимальному решению — использованию волоконного лазера с полупроводниковой накачкой (рис. 4.12). Он не требует водяного охлаждения, не имеет изнашиваемых компонентов и обладает рекордным КПД.

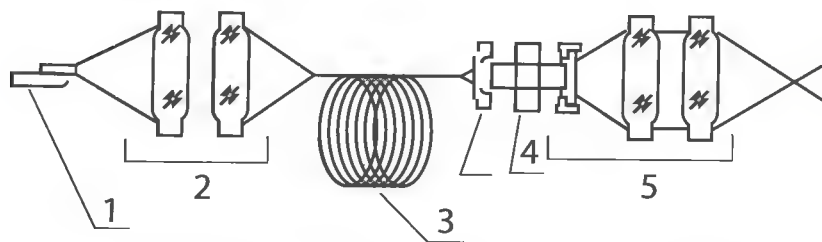


Рис. 4.12. Схема оптического плоттера *LaserGraver*. 1 — лазер; 2 — оптическая система; 3 — оптоволоконные линии; 4 — обтюратор; 5 — оптическая линейка

Продолжением технологии *LaserGraver* должно явиться непосредственное формирование рисунка на масочном покрытии заготовки печатной платы, минуя фотошаблоны и фоторезисты.

ГЛАВА 5

ПРОЦЕССЫ ПЕЧАТИ

5.1. Введение

Понятие «печатная плата» расшифровывается самим названием этого объекта. Плата означает плоское основание. Оно может быть жестким и гибким. Но главное, что от него требуется — иметь способность для восприятия технологий печати: фотолитографии, трафаретной или офсетной печати и т.п.

Технологии печатных плат заимствовали процессы печати из полиграфического производства, в котором их великое множество, но устоялись в них лишь фотолитография, трафаретная печать и очень редко (в массовом производстве простых плат) офсетная печать. Но какими бы ни были процессы печати, все они начинаются с процессов фотолитографии, когда то или иное изображение формируется с фотошаблона в слое фоточувствительного полимера. Поскольку назначение рельефа, образуемого фотополимерами, быть устойчивым к растворам травления и электролитам, их называют фоторезистами.

5.2. Фотолитография

Определенные вещества теряют стойкость к воде или специфическим растворителям, например, к спирту и щелочи, под воздействием света. Этот эффект используется при изготовлении структурированных слоев методом фотопечати для защиты поверхности фольги при использовании субтрактивного метода перед травлением или перед гальваническим усилением. Метод фотолитографии применяется также на начальных этапах всех процессов печати (офсетной, трафаретной и др.) и выступают самостоятельно

при изготовлении интегральных микросхем и печатных плат, где требуется высокая прецизионность. Преимущества фотолитографии перед трафаретной и офсетной печатью заключаются в экономичности обработки малых серий изделий (так как не требуются сетчатые трафареты или клише), а также в четком изображении элементов рисунка.

5.2.1. Фотополимеры

Фоточувствительность полимеров проявляется или в фотополимеризации или в фотодеструкции. Первые называются негативными фоторезистами, вторые — негативными.

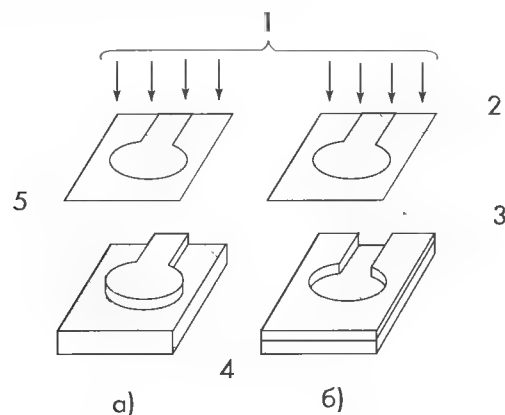


Рис. 5.1. Формирование рисунка: а) из позитивного фоторезиста, б) из негативного фоторезиста.

Негативные фоторезисты — мономеры, полимеризующиеся под действием света. В результате фотополимеризации они теряют способность к растворению в специально подобранных растворителях. Их название «негативные» обусловлено тем, что они после проявления остаются под прозрачными участками фотошаблона, т.е. они инвертируют изображение. В таблице 5.1 показаны примеры мономеров, способных к реакциям фотополимеризации в присутствии соответствующего фотоинициатора.

Позитивные фоторезисты — полимеры, разрушающиеся под действием света (происходит фотодеструкция полимеров).

Таблица 5.1. Олигомеры и мономеры, поддающиеся фотополимеризации

№	Название мономера	Обозначение	Структурная формула, молекулярная масса
1. Олигомеры			
1.1.	Олигоэфирметакрилат	ТГМ-3	$H_2=C(CH_3)C(O)(CH_2CH_2O)_3C(O)C(CH_3)=CH_2MM = 270$
1.2.	Олигокарбонатметакрилат	ОКМ-2	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_2OC(O)O(CH_2)_2O(CH_2)_2OC(O)O(CH_2)_2O-C(O)C(CH_3)=CH_2MM = 418$
1.3.	Олигоуретанметакрилат	Акрол	Продукты конденсации • различных лапролов • различных диизоцианатов • МЭГ (метакрилового эфира этиленгликоля) $MM 600 - 24000$
2. Мономеры			
2.1.	Октилметакрилат	ОМА	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_7CH_3$
2.2.	Бутилметакрилат	БМА	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_3CH_3$
2.3.	Метилметакрилат	ММА	$CH_2=C(CH_3)C(O)OCH_3$
2.4.	Метакриловая	МАК	$CH_2=C(CH_3)C(O)OH$
2.5.	Метакриловые эфиры		
	• метилкарбита	МДЭМ	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_2O(CH_2)_2OCH_3$
	• бутилцеллозольва	МБЦ	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_2O(CH_2)_3CH_3$
	• бутилкарбита	МБК	$CH_2=C(CH_3)C(O)O(CH_2)_2O(CH_2)_2O(CH_2)_3CH_3$
	• пропиленгликоля	МПГ	$CH_2=C(CH_3)C(O)OCH_2CH(CH_3)OH$

Преимущества негативных фоторезистов в их хорошей устойчивости после проявления, которую еще больше можно улучшить термодублированием. Заготовки с рельефом из позитивных фоторезистов необходимо постоянно хранить и использовать при неактивном освещении. Иначе будет происходить их разрушение под действием света с потерей устойчивости к химически агрессивным средам. Тогда почему позитивные фоторезисты находят применение?

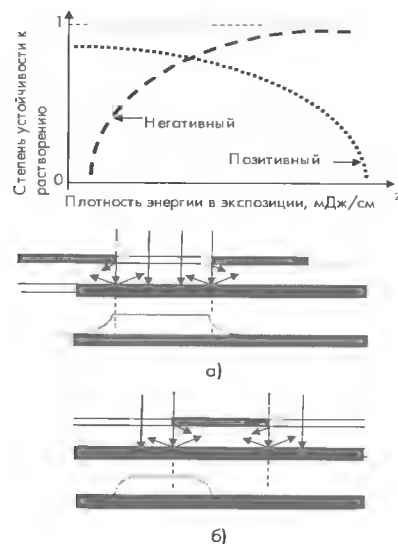


Рис. 5.2 Эффекты на границах элементов изображения в рельефах негативного и позитивного фоторезистов за счет подсветок границ отбрасыванием и дифракцией: а — рельеф негативного фоторезиста имеет размытую границу; б — рельеф позитивного фоторезиста имеет четкую границу

Фоторезисты обычно представляют собой композиции из светочувствительных органических веществ, пленкообразователей (феноло-формальдегидные и др. смолы), органических растворителей и специальных добавок. Фоторезисты характеризуют светочувствительностью, контрастностью, разрешающей способностью и теплостойкостью. Область спектральной чувствительности фоторезистов определяется наличием в светочувствительных органических веществах хромофорных групп, способных к фотохимическим превращениям, и областью оптической прозрачности пленкообразователя.

По спектральной чувствительности различают фоторезисты для видимой области спектра, ближнего ($\lambda = 320...450$ нм) и дальнего

Позитивные фоторезисты обеспечивают лучшее разрешение рисунка за счет четкости края. Рис. 5.2 поясняет эффекты, происходящие на границах элементов изображения. Когда нужно хорошее и устойчивое разрешение микронного рисунка используют жидкий позитивный фоторезист: малая толщина (3...4 мкм) и четкость края (± 3 мкм) обеспечивают надежное воспроизведение проводников и зазоров в рельефе резиста 30/30 мкм. Негативные фоторезисты используют в большем диапазоне ширины проводников и зазоров, начиная от 50/50 мкм и более.

5.2.2. Фоторезисты

Фоторезисты — светочувствительные материалы, применяемые в фотолитографии для формирования рельефного покрытия заданной конфигурации и защиты нижележащей поверхности от воздействия травителей.

($\lambda = 180...320$ нм) УФ-излучения, по характеру взаимодействия с излучением делят на позитивные и негативные. Фоторезисты могут быть жидкими, сухими и пленочными. Жидкие фоторезисты содержат 60-90% по массе органического растворителя, пленочные — менее 20%, сухие обычно состоят только из светочувствительного вещества. Жидкие фоторезисты наносят на подложку центрифугированием, напылением (пневматической) или накаткой вальками, сухие — напылением и возгонкой, пленочные — накаткой (ламинированием). Последние имеют вид пленки, защищенной с двух сторон тонкой пленкой светопроницаемого полимера, например, полиэтиленовой с одной стороны и полиэфирной — с другой. Методом полива и с последующим центрифугированием жидких или методом возгонки сухих фоторезистов формируют тонкие слои (3...4 мкм). В непрерывном производстве жидкие фоторезисты (чаще всего композиции паяльных масок) наносят «мокрым занавесом».

Для успешного покрытия необходимы тщательная очистка и обезжиривание поверхности заготовок.

Покрывание окунанием осуществляется путем погружения заготовки в кювету, наполненную фоторезистом, и вытягивания с постоянной скоростью (от 10 до 50 см/мин). Толщина слоя зависит от вязкости фоторезиста и скорости вытягивания. При больших скоростях получают более толстые слои, которые, однако, имеют худшую разрешающую способность. Покрывание окунанием пригодно для фоторезистов всех видов при наименьших затратах на оборудование, к тому же оно дает сразу двухстороннее покрытие заготовок фоторезистом.

При центрифугировании заготовки устанавливаются в центробежной установке горизонтально. Фоторезист растекается, и излишки его сбрасываются с поверхности заготовки под действием центробежной силы. Толщина слоя зависит от частоты вращения и от вязкости фоторезиста. Недостатками являются большая потеря фоторезиста.

При методе накатки можно наносить более равномерные по толщине слои, но для этого нужны специальные фоторезисты, которые бы не так быстро высыхали на валах вальковой установки. Толщину слоя можно регулировать изменением скорости установки и варьированием зазоров между лакирующими валами и каландрирующими валами.

Жидкие фоторезисты перед экспонированием высушивают. При этом следят за отсутствием пыли: всякая грязь и пыль воспроизводятся в изображении рисунка.

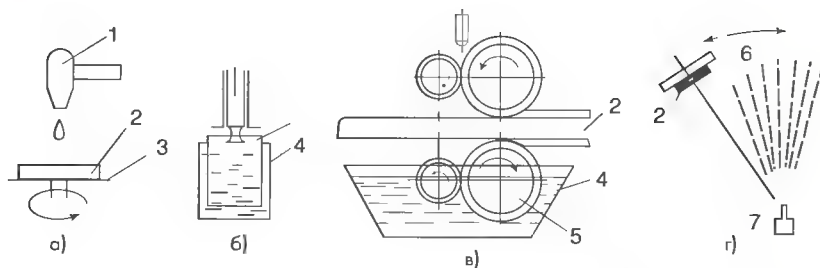


Рис. 5.3. Способы нанесения жидких фоторезистов: а) центрифугированием, б) медленным вытягиванием, в) валками, г) пульверизацией. 1 — полив эмульсии; 2 — подложка; 3 — стол центрифуги; 4 — ванна с эмульсией; 5 — вал для переноса эмульсии; 6 — подвижный стол; 7 — пульверизатор.

Сухим пленочным фоторезистом называют комбинированную пленку, у которой позитивный или негативный светочувствительный слой толщиной 10—40 мкм находится между защитными пленками из полиэтилена и полиэфира толщиной 30 мкм.

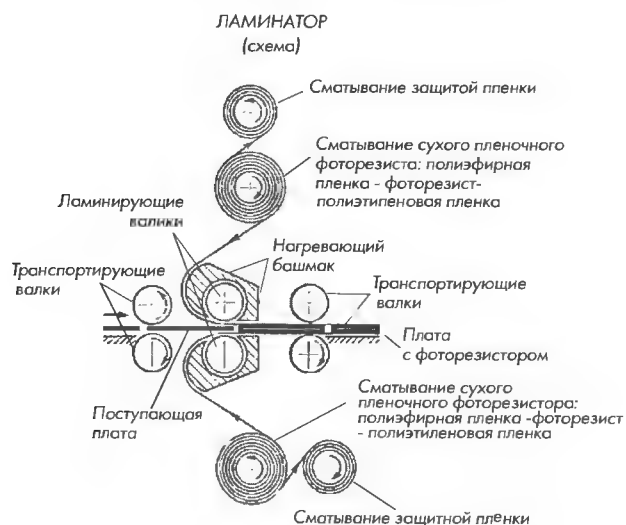


Рис. 5.4. Схема нанесения пленочного фоторезиста с помощью ламинатора

Сухие фоторезисты наносят на заготовку с помощью специальных *ламинаторов* (рис 5.4). В ламинаторе снимается полиэтиленовая пленка, а оставшаяся композиция сухого фоторезиста с полиэфирной пленкой нагревается и соединяется под давлением с поверхностью заготовки. Сухие фоторезисты обладают следующими преимуществами:

- острые кромки могут быть перекрыты (толщина слоя 30 мкм);
- толщина слоя не зависит от метода покрытия;
- нет необходимости в подготовке фоторезиста по консистенции и в его очистке (разжижение, фильтрация);
- не нужна сушка;
- мало работ по ретуши.

5.2.3. Процессы при экспонировании фоторезистов

При экспонировании в слое фоторезиста образуется скрытое изображение. При этом светочувствительный компонент претерпевает ряд фотохимических превращений: подвергается фотополимеризации или структурированию либо разлагается с выделением газообразных продуктов. Благодаря именно этим механизмам светочувствительные вещества закрепляются (сшиваются) на экспонированных участках и не удаляются при дальнейшем проявлении под действием органических или водно-щелочных растворителей (негативные фоторезисты), либо переходят в растворимое состояние и легко удаляются с экспонированных участков при проявлении (позитивные фоторезисты).

Позитивные фоторезисты — композиции, содержащие в качестве светочувствительного компонента сульфозфиры *О*-нафтохинондиазида (5–40 % по массе), а в качестве пленкообразователя — новолачные смолы (до 50%). При экспонировании сульфозфир переходит в сульфопроизводное инденкарбоновой кислоты и при проявлении под действием водно-щелочного растворителя удаляется с экспонированных участков поверхности вместе со смолой.

Среди негативных фоторезистов наиболее распространены композиции на основе циклоолефиновых каучуков с диазидами в качестве сшивающих агентов, а также сенсibilизированные поливиниловый спирт, поливинилциннамат и др. Сшитый полимер закрепляется на подложке, а рельефное изображение (маска) образуется в результате вымывания фоторезиста с неэкспонированных участков.

Для дальнего УФ-излучения применяют позитивные фоторезисты на основе сенсibilизированных полиметакрилатов и арилсульфозифиров с фенольными смолами, а также негативные фоторезисты на основе композиций галогенированных полистиролов и диазидов с феноло-формальдегидными и др. смолами.

Перспективны фоторезисты, работающие на принципе химического усиления скрытого изображения. Такие фоторезисты в качестве светочувствительного компонента содержат ониеые соли (например, $Ph_3S^+X^-$ и $Ph_2I^+X^-$, где $X = AsF_6, SbF_6, PF_6, CF_3SO_3$), катализирующие реакции компонентов фоторезистов (например, эфиров нафтолов, резольных смол).

Позитивные фоторезисты чувствительны к экспозиции 10–250 мДж/см², имеют разрешающую способность 2...3 мкм, контрастность 1,5–5, теплостойкость 120...140 °С. Негативные фоторезисты, как правило, более чувствительны, но имеют худшую разрешающую способность из-за размытости края рисунка.

При изготовлении позитивных фоторезистов, работающих в коротковолновой области УФ-излучения ($\lambda = 250...370$ нм), применяют композиции на основе производных полиметакрилатов (галоген-, циано- и амидозамещенных), полиалкиленкетон и полиолефинсульфонов. Для негативных фоторезистов высокого разрешения используются гомо- и сополимеры производных метакрилата, бутадиена, изопрена, стирола, кремнийорганических соединений и др.

5.2.4. Разрешающая способность

Основные характеристики фотолитографического процесса: разрешающая способность, т. е. способность разделять воспроизводить мелкие элементы рисунка (обычно оценивается по минимальной ширине воспроизводимой линии) и производительность технологии (длительностью экспонирования). Разрешение фоторезиста определяется следующим образом: слой фоторезиста копируется линейным растром, ширина линий которого равна расстоянию между ними. Этот растр уменьшается до тех пор, пока линии не перестают дискретно пропечатываться. В качестве меры разрешающей способности принимается число линий на миллиметре (рис. 5.5) или расстояние между двумя соседними линиями. В особых условиях можно достигнуть разрешения до 1 мкм. Беспористость зависит от толщины слоя, которую для обеспечения сплошности пленки из жидких фоторезистов

необходимо иметь 10 мкм. Нанесение фоторезистов, а также хранение и обработка покрытых ими заготовок до проявления должны производиться в помещениях только с неактивным (желтым) светом.

Разрешающая способность определяется главным образом способом экспонирования, длиной волны воздействующего излучения и характеристиками фоторезиста. Теоретически предел разрешающей способности, согласно критерию Рэля, — величина, равная половине длины

волны экспонирующего излучения. Однако из-за неидеальности оптических систем экспонирования, неплоскостности подложек и шаблонов и других факторов практически достигаемая разрешающая способность фотолитографии значительно ниже теоретической.

В зависимости от вида воздействующего на фоторезист излучения различают оптическую фотолитографию, электролитографию, рентгено-литографию и ионолитографию, осуществляемые соответственно с использованием фоторезиста, электронрезиста, рентгенрезиста и ионрезиста. Оптическая фотолитография обычно использует излучение с длиной волны $\lambda = 0,36...0,45$ мкм. Это наиболее распространенный в микроэлектронике вид фотолитографии. Посредством фотолитографии возможно воспроизведение рисунков с размерами элементов от 1,0...2,0 мкм и более.

Фотолитография с использованием глубокого УФ излучения (УФФ) ($\lambda = 0,20...0,30$ мкм) отличается от обычной фотолитографии более высокой разрешающей способностью за счет меньшей длины волны экспонирующего излучения: возможностью воспроизвести элементы с размерами 0,5...0,8 мкм и менее. Обычные фоторезисты в УФФ практически неприменимы. Разработаны специальные материалы, чувствительные к глубокому УФ излучению. УФФ — перспективный вид фотолитографии для процессов с высоким разрешением рисунка.

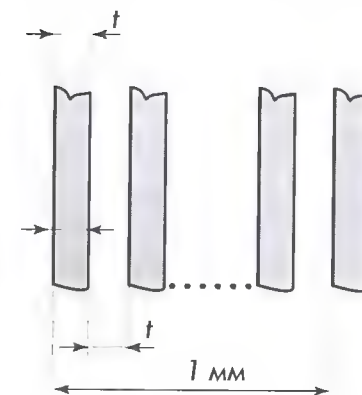


Рис. 5.5. К понятию «разрешающая способность»

5.2.5. Экспонирование фоторезиста

Экспонирование фоторезиста производится через фотошаблон. Различают контактную и проекционную фотолитографию (рис. 5.6). В первом случае фотошаблон плотно прижат к слою фоторезиста (рис. 5.6, а), во втором — изображение фотошаблона проецируется на поверхность фоторезиста (рис. 5.6, б). Простота контактного способа обеспечила ему широкое распространение в технологии микроэлектроники. Его существенные недостатки — ограничение разрешающей способности из-за явлений дифракции — подсветки (рис. 5.7) и возможность повреждения при контакте фотошаблона с прижимом и плёнкой фоторезиста. Проекционный способ имеет более высокую разрешающую способность, но требует достаточно сложного оборудования. При этом срок службы фотошаблона возрастает в несколько десятков раз.

УФФ также может быть контактной и проекционной. При этом фотошаблоны по конструкции аналогичны фотошаблонам для обычной фотолитографии за исключением того, что в качестве про-

зрачного материала применяется кварц, пропускающий излучение в данной области спектра. Источниками излучения при экспонировании УФФ-фоторезистов могут служить ртутно-ксеноновые, дейтериевые и др. лампы, а также лазеры с подходящей длиной волны.

Для переноса рисунка на фоторезист применяют фотошаблоны на пленочной основе (фотопленки), а при особых требованиях к точности — стеклянные фотошаблоны. Качество изготовления рисунка печатных плат зависит от качества фоторезиста и фотошаблонов, а также от точности воспроизведения всех режимов экспонирования. Ввиду того, что излишне боль-

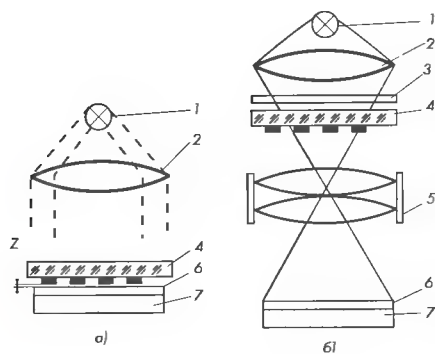


Рис. 5.6. Методы экспонирования фоторезиста: а — контактный (зазор $Z = 0$) и на микрозазоре ($Z \approx 10$ мкм); б — проекционный; 1 — источник актиничного излучения; 2 — конденсор; 3 — фильтр; 4 — фотошаблон; 5 — объектив; 6 — фоторезист; 7 — подложка.

шой зазор между подложкой и фотошаблоном ведет к дефокусировке изображения, заготовку с рабочими фотошаблонами, прикрепленными с одной или двух сторон, помещают в вакуумную копировальную раму. Совмещение фотошаблонов с подложкой осуществляется с помощью фиксирующих элементов, общих для подложки и фотошаблона.

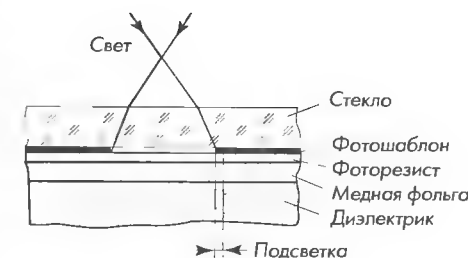


Рис. 5.7. Подсветка фоторезиста за счет паралакса и дифракции.

На качество изображения оказывает влияние не только взаимное расположение подложки и фотошаблонов, но также и световые характеристики при экспонировании. При этом необходимо учитывать:

- длину волны света (вследствие спектральной чувствительности фоторезиста);
- равномерность засветки поверхности;
- направление лучей света;
- действие света в слое фоторезиста.

В качестве источников света чаще всего применяются паротутные лампы, специальные трубчатые светильники и галогенные лампы, которые работают в ультрафиолетовой области (300—450 нм). Равномерность засветки при использовании трубок может быть улучшена, если подложку перемещать с постоянной скоростью перед светящейся щелью (коллиматором). Вследствие диффузного светового потока возникает подсветка, отрицательно влияющая на четкость изображения элементов схемы (см. рис. 5.7). Этот эффект усиливается при рассеивании света в слое фоторезиста и при распространении полимеризации, когда неосвещаемые группы молекул возбуждаются освещаемыми.

Для проявления экспонированные подложки подвергают воздействию специальных проявляющих растворов в течение приблизительно двухминутного погружения или опрыскивания. Проявители растворяют засвеченные или не засвеченные слои в зависимости от типа фоторезиста (негативный или позитивный). Установки для проявления с помощью опрыскивания, как правило, совмещены с моющими и сушильными устройствами.

После проявления контролируют наличие пор в слое фоторезиста, места включения пыли, отсутствие фоторезиста на подвергнутых экспонированию местах (края, неровности, поверхность подложки) и при необходимости ретушируют. Для обеспечения ретуширования слой фоторезиста при проявлении контрастно окрашиваются.

5.2.6. Инженерное обеспечение качества изображения

Основные факторы, определяющие результат комплекса операций экспонирования/совмещения:

- качество экспонирования (разрешение) и точность совмещения при экспонировании;
- окружающая среда (температура, влажность, наличие частиц пыли);
- стабильность геометрических размеров фотошаблона;
- совмещение рисунка при последующих операциях (прессовка, сверление).

Для серийного производства печатных плат с разрешением до 0,2...0,3 мм вполне достаточно установок экспонирования с источником рассеянного света. Основная функция отражателя у них — увеличение удельной освещенности в плоскости фотошаблона (фоторезиста). Отличительная черта таких установок — простота устройства и эксплуатации, достаточная удельная энергия экспонирования и неравномерность потока света по полю до 50%. Из-за присущих таким установкам боковых пучков света размыв края рисунка может достигать половины толщины фоторезиста (до 20...30 мкм). Однако здесь есть и преимущество — в таких установках пылевые частицы, попадающие в зону экспонирования, не причиняют значительного вреда именно благодаря боковым пучкам, поскольку их отпечаток размывается (рис. 5.8, а). Конечно, речь идет о частицах разумного размера — не более 30 мкм. Производство печатных плат такого уровня не требует организации специальных чистых комнат. Вполне достаточно климатизированных помещений с колебанием температуры до 5°C и влажности до 20%. Перегрев фотошаблона в зоне экспонирования в таких установках может достигать 10°C, что приводит к изменению диагонали фотошаблона в 500 мм на 90 мкм. Еще одна из особенностей таких установок экспонирования — устройство совмещения рисунка в них не является составной частью установки. Это, по своей сути, некоторое дополнительное приспособление, которым установку оснащает сам пользователь.

В более простых случаях совмещение выполняется с помощью различных «конвертов», пистонов, кнопок, а в более сложных применяются специальные рамки экспонирования со встроенными штифтами. Однако для устойчивого серийного производства печатных плат перешагнуть порог разрешения 0,20/0,20...0,17/0,17 мм не позволяют даже лучшие установки этого класса.

Выпуск печатных плат с разрешением зазор/проводник 0,15/0,15 мм предъявляет особые требования к окружающей среде, системе экспонирования и системе совмещения. Установки экспонирования для таких печатных плат представляют собой оптические машины со специализированными источниками света. Очень важная особенность этих современных установок заключается в том, что система совмещения фотошаблонов и заготовки, а также система охлаждения установки и термостабилизации фотошаблона — неотъемлемые элементы их конструкции.

Установки экспонирования, предназначенные для производства печатных плат высокой степени интеграции, могут иметь угол расхождения световых пучков до 9-10° и оптический размыв края рисунка до 3...5 мкм (чем тоньше фоторезист, тем меньше размыв). Эти установки оснащаются точечным источником света, и в таких машинах пылевые частицы в зоне экспонирования уже могут повлиять на качество отпечатка из-за относительно малого угла расхождения светового потока (рис. 5.8, б). Отсюда и вытекают требования к чистоте производственного помещения. Это обязательно должны быть чистые комнаты класса 10 000-100 000.

При экспонировании печатных плат этого класса уже не применяется пробивка базовых отверстий в фотошаблонах и совмещение фотошаблонов между собой и с заготовками с помощью

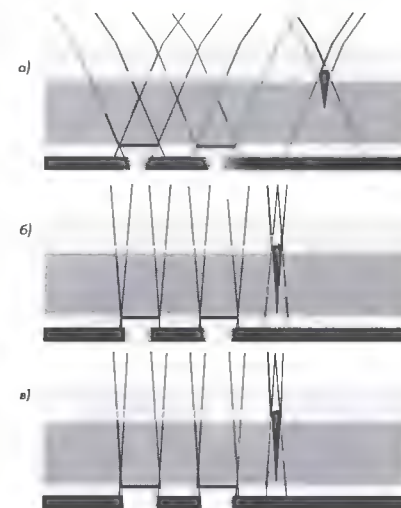


Рис. 5.8. Воспроизведение пылевых частиц в различных системах экспонирования: а) от источника рассеянного света, б) от точечного источника света, в) от коллимированного источника света.

различных штифтов. Такой метод не дает нужной точности совмещения. Совмещение в таких установках выполняется с помощью специальной системы перемещения фотошаблонов и заготовки на основе автоматического или полуавтоматического анализа изображения расположения реперов, внесенных в технологическое поле фотошаблона.

Следующий уровень — это установки экспонирования с коллимированным источником света. Угол расхождения их световых пучков составляет $5...6^\circ$, оптический размыв края — $1,7...2,6$ мкм (рис.5.8, в). Такие установки ориентированы на производство печатных плат с размерами элемента до 50 мкм. Соответственно возрастают и требования к условиям производства (класс чистых комнат не ниже 10 000). Естественно, совмещение в таких установках также выполняется с помощью специальной системы перемещения фотошаблонов и заготовки на основе анализа изображения реперов системами технического зрения.

Когда потребуется создать производство, ориентированное на воспроизведение рисунка с шириной линий менее 50 мкм, необходимы установки экспонирования с коллимированный источник света, имеющие угол расхождения световых пучков порядка $1-1,5^\circ$ и дающие оптический размыв края $0,3-1$ мкм. Переход от одного класса машины к следующему должно неизбежно сопровождаться повышением класса чистых комнат. Если приобретается более совершенная машина, но не повышается класс чистоты, это идет только во вред производству.

Оптическое разрешение нельзя рассматривать в отрыве от системы термостабилизации фотошаблона и систем совмещения, встроенных в установку. В ходе экспонирования фотошаблон не должен подвергаться воздействиям, способным привести к недопустимому искажению геометрии исходного изображения. Речь идет об изменении температуры фотошаблона в результате нагрева. Как было показано в главе четвертой, пленки, применяемые для фотошаблонов, имеют значение теплового расширения порядка $18 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$ -м. Это означает, что если в процессе экспонирования фотошаблон размерами 500×500 мм нагреется на 10°C , то его диагональ увеличится примерно на 127 мкм, что недопустимо при производстве высококлассных печатных плат.

Нагрев фотошаблона может происходить по двум основным причинам. Первая — ИК-излучение, присутствующее в спектре УФ-ламп и попадающее на заготовку и фотошаблон. Вторая причина — переход тепла той части потока УФ-излучения, которая задерживается черной, непрозрачной частью фотошаблона. При удельной мощности экспонирования

20 мВт/см² эта часть составляет около 2 кВт/м². Это очень много. При выборе установки экспонирования для печатных плат с высокой плотностью межсоединений нужно быть уверенными, что перегрев фотошаблона не превышает 3°C .

5.2.7. Материалы паяльных масок.

Паяльные маски покрывают поверхность печатных плат так, чтобы открытыми оставались только печатные элементы для пайки или микросварки. Это необходимо не только для экономии припоя при групповых методах пайки, но и для уменьшения массы плат, устранения термомеханических напряжений на печатных проводниках. Одновременно паяльные маски выполняют активную роль электроизоляционного и влагозащитного покрытия. Их специально выполняют гидрофобными и в меру влагостойкими.

Существуют две разновидности материалов для паяльных масок: жидкие и пленочные. Жидкие композиции (эмали, краски) представляют собой вязкотекучую массу, которая наносится на поверхность платы методами трафаретной печати, а затем отверждается. Пленочные материалы представляют собой пленочные фоторезисты, которые накладываются на поверхность платы, а затем обрабатываются методами фотолитографии так, чтобы открылись печатные элементы для пайки.

Паяльные маски наносятся на рельеф печатных проводников. Поэтому для наклеивания пленок вынуждены использовать, так называемые, вакуумные ламинаторы, в которых из пазух между печатными проводниками высасывается воздух и тем самым предотвращается образование пузырей. Вакуумный ламинатор рентабелен только в массовом производстве, так чтобы заготовки плат шли через ламинатор непрерывным потоком, иначе много пленки уходит в отход. В серийном производстве более целесообразно использование эмалей и красок, которые можно наносить методами сеткографии. Однако трафаретная печать не обладает таким разрешением, как фотолитография. В таких случаях используют фотопроявляемые краски и эмали, способные обрабатываться методами фотолитографии. В этом случае станок трафаретной печати используется лишь для нанесения ровного слоя определенной толщины. А рисунок после подсушивания формируется экспонированием через фотошаблон и проявлением в соответствующих растворах.

Толщины пленочных фоторезистов для паяльных масок могут быть 60 и 90 мкм. Толщина паяльной маски — $30...40$ мкм.

Выбор паяльной маски обусловлен классом плат, которые необходимо изготовить. Для печатных плат с разрешением 0,3...0,5 мм при больших сериях экономически оправдано использование трафаретной печати. Для плат средней степени интеграции целесообразно использование сухой пленочной фотопроявляемой защитной паяльной маски, но применение ее потребует дополнительных капиталовложений на приобретение оборудования для ее нанесения. По мере усложнения печатных плат при размерах проводников и зазоров от 0,1/0,1 мм и менее можно использовать только жидкую фотопроявляемую маску, а при работе с отверстиями менее 100 мкм необходимо оборудование «мокрого занавеса» и прецизионные печи для термодублирования. Каждый шаг на пути усложнения печатных плат влечет значительное удорожание используемого оборудования, материалов и химикатов.

5.3. Трафаретная печать

В производстве печатных плат и толстопленочных интегральных микросхем трафаретная печать является важнейшим процессом для создания рисунков на основе химически стойких красок, эмалей и паст. В качестве основы используют плоские фольгированные или нефольгированные подложки, синтетические и керамические материалы. В технологиях печатных плат трафаретной печатью наносят:

- резисты — синтетические краски для травления рисунка печатных плат субтрактивным методом;
- паяльные маски — электроизоляционные покрытия, как правило, на эпоксидной основе;
- маркировки — композиции, состоящие из связующего, растворителей и мелкодисперсной основы (наполнитель и пигмент);
- специальные пасты для формирования пассивных компонентов — резисторы, слои, формирующие конденсаторы
- паяльные пасты.

Рис. 5.9 иллюстрирует принцип трафаретной печати: эластичный ракель, движущийся вдоль трафарета, продавливает через отверстия в нем пасту к поверхности подложки. Подложка устанавливается на плоском основании, трафарет закрепляется в раме, которая может подниматься.

Качество слоя при трафаретной печати зависит от большого числа факторов. Важнейшими из них являются:

- материал сита,

- частота плетения (или шаг и размеры отверстий),
- натяжение трафарета,
- тип маскирования,
- состав и свойства резиста;
- метод печати (контактная или проекционная);
- режим работы и оборудование (угол касания, установка рамы, скорость движения ракеля и т. д.);
- состояние подложки (плоскостность, шероховатость, чистота поверхности).

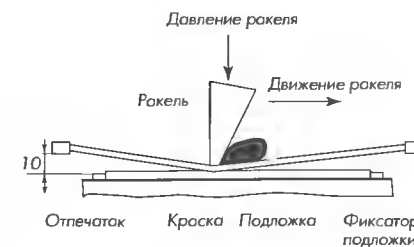


Рис. 5.9 Принцип трафаретной печати.

Сетчатые трафареты изготавливают из капроновой или полиэфирной сетки на основе моноволокна с толщиной нити 40 мкм и частотой плетения 80–200 нитей/см или сетки из нержавеющей стали с толщиной проволоки 30–50 мкм и частотой плетения 60–160 проволоки/см, которые натягиваются с удлинением 4–5% для нейлона, 2% для полиэфира или упруго для нержавеющей стали с помощью механических или пневматических приспособлений на стабильные металлические, реже деревянные рамы. Необратимое изменение размеров вследствие вытягивания ниток ведет к уменьшению сроков службы синтетических трафаретов. Металлические сита более устойчивы для многократного тиражирования, но значительно дороже по сравнению с синтетическими.

Таблица 5.2. Технические характеристики капроновых сеток

Номер сетки	Размер отверстия (ячейки), мкм	Коэффициент живого сечения, % ¹	Толщина ткани, мкм
49	143	47,7	80...90
52	142	53,4	70...80
55	132	51,5	70...80
58	122	48,9	70...80
64	106	45,0	70...80
70	93	41,5	70...80
73	87	42,6	70...80
76	82	38,9	70...80

¹ Коэффициент живого сечения — это отношение площади просвета в ячейках к общей площади ткани

Таблица 5.3. Технические характеристики металлических сеток

Номер сетки живого сечения, % ²	Размер отверстия (ячейки), мкм Толщина проволоки, мкм		Коэффициент
01	100	34,6	70
009	90	31,6	70
008	80	30,0	55
006	60	32,0	40
005	50	31,0	35
004	40	28,0	30

² Коэффициент живого сечения — это отношение площади просвета в ячейках к общей площади ткани

Натяжение сеток и фиксация их на рамах производится на специальных столах с устройствами натяжения. На рис. 5.10 показано пневматическое устройство натяжения сеток, имеющее захваты краев сетки, связанные штоком с поршнем, который перемещается в цилиндре сжатым воздухом. Башмаки каждой растяжки упираются в раму сита, а захваты растягивают сетку. Натяжение сетки контролируют манометром и регулируют редуктором. Фиксация натянутых сит на раме производится с помощью быстротвердеющих клеев на эпоксидной или акрилатной основе. После отверждения клея сетку обрезают по краю и тестируют ее натяжение специальным прибором, измеряющим усилие деформации сита на определенную глубину. Это усилие измеряется по всему полю трафарета, чтобы убедиться в его равномерности.

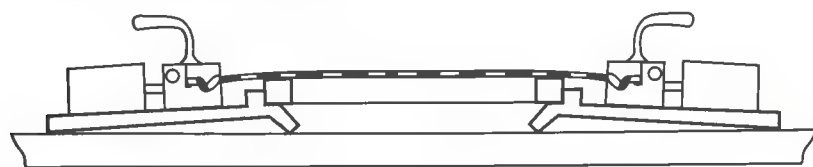


Рис. 5.10. Пневматическое устройство натяжения сеток

Известны и другие устройства для натяжения сеток: винтовые, игольчатые (храповиковые) и др. Однако они уступают пневматическим в удобстве обслуживания, производительности и качестве выполнения операции натяжения и фиксации сеток в раме.

Для создания сетчатых трафаретов могут быть использованы методы с прямым и косвенным нанесением эмульсии. В первом случае ячейки сетки заполняются эмульсией, чувствительной к ультрафиолетовому излучению. При экспонировании через фотошаблоны эмульсия затвердевает, а не засвеченные места селективно растворяются (рис. 5.11.). При этом методе ячейки сетки или полностью открыты, или полностью закрыты, т. е. получение структур, пересекающих ячейки, невозможно. При косвенном методе фоточувствительные пленки экспонируются на пленочном основании и только после проявления в размягченном состоянии переносятся под давлением на сетку. После сушки и затвердевания проявляют пленочное основание. Этим методом можно получать структуры, пересекающие ячейки.

Особо точные и прочные шаблоны выполняют из металлической фольги, на которой вытравливается или гравировается лазером нужный рисунок (перфорация). Такие металлические трафареты широко используются для нанесения паяльной маски.

Вязкость трафаретных красок и содержание в них твердых веществ во многом определяют процесс печати и качество слоев. Основопологающая характеристика трафаретных красок — тиксотропность — свойство красок не расплываться и не растекаться по поверхности основания. Их тиксотропность должна быть такой, чтобы обеспечивалась воспроизводимость структуры, т. е. не расплывались требуемые контурные линии. Содержание твердых веществ определяет толщину слоя, а, следовательно, и устойчивость слоя к химическим растворам. Современные резисты для трафаретной печати позволяют получать проводники (и зазоры между ними) шириной не менее 0,2 мм. Но чаще ограничиваются воспроизводимостью рисунка не хуже 0,3 мм.

При трафаретной печати трафарет располагают на определенном расстоянии от поверхности подложки (рис. 5.9). Ракель прижимает трафарет к участкам, на которые наносится паста или резистивная краска, а упругие напряжения обеспечивают его отделение от подложки непосредственно за ракелем. Зазор между подложкой и трафаретом в зависимости от размеров последнего равен 3...10 мм.

При невысоких требованиях к точности рисунка и качеству слоев, а также при небольших партиях применяют простые устройства для трафаретной печати, в которых рама с трафаретом относительно

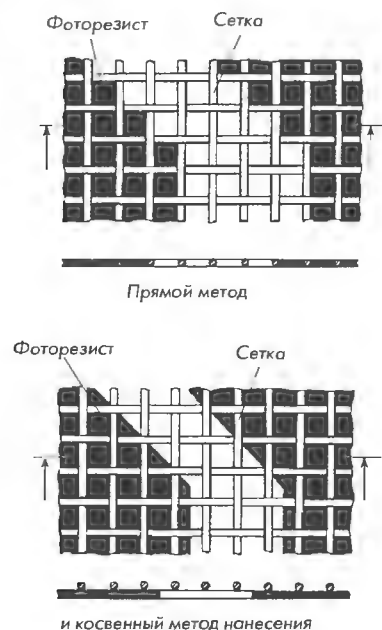


Рис. 5.11. Прямой и косвенный методы изготовления сетчатых трафаретов

Важнейшими конструктивными элементами установок для нанесения паст являются подвижный механизм, в котором устанавливается печатная рама, устройство привода к управлению ракелем, устройства фиксирования подложек и установки трафаретов относительно поверхности печати. Механизм установки рамы может закрепляться:

- на петлях с поворотом;
- в осевых подшипниках с поворотом;
- горизонтально в четырех точках с вертикальным движением;
- горизонтально со сдвиговым вертикальным движением.

Критериями оценки различных конструкций являются:

- время установки и съема,
- отсутствие пыли
- поведение краски в трафарете при повороте рамы.

подложки устанавливается с помощью специальных выступов или фиксирующих штифтов, а рапель перемещается вручную.

Так как в электронике часто необходимо обеспечить высокую точность совмещения печатного рисунка относительно контура подложки или нескольких печатных рисунков относительно друг друга при высоком качестве слоев и большой производительности, то применяют, как правило, полуавтоматические и автоматические установки для нанесения паст, в которых производится автоматическая или ручная загрузка стола, автоматически совмещается рисунок трафарета с подложкой, выдерживается установленная скорость движения ракеля, автоматически выгружаются заготовки.

Ракель представляет собой прямоугольную заточенную полосу резины с твердостью 45—65 единиц по Шору, установленную таким образом, что обеспечивается ее плоскопараллельное движение по отношению к подложке под углом 60—70°. Наиболее сложным при этом является обеспечение равномерной скорости перемещения ракеля. Ракелем можно управлять механически на основе цепной передачи. Однако возникающее при этом толчкообразное движение требует применения массивных рам или дополнительных тормозных устройств.

Вторым вариантом является пневматическое управление ракелем, однако неравномерность давления приводит к колеблющейся скорости перемещения, которая ухудшает качество печати. Наиболее равномерную работу обеспечивает гидропневматическое управление, которое, однако, вследствие конструктивных трудностей и высокой стоимости применялось до сих пор в небольшом количестве установок.

После установки подложек с помощью направляющих ребер или установочных штифтов их фиксация на основании производится посредством вакуумного присоса. Установка сетчатого трафарета относительно подложки основана на перемещении рамы и основания; при этом с помощью точных индикаторов длины возможна корректировка совмещения микровинтами.

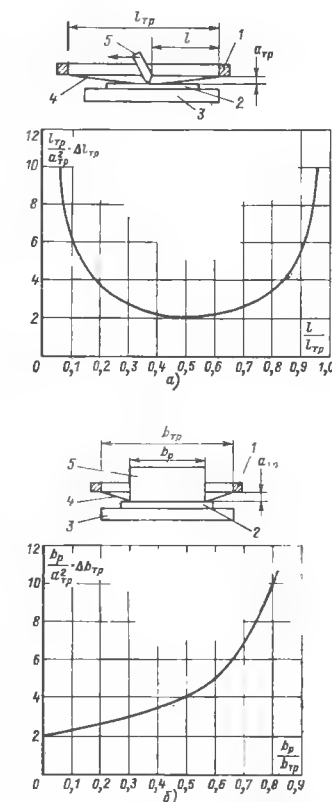


Рис. 5.12. Искажение линейных размеров рисунка при трафаретной печати: а) в направлении движения ракеля, б) в поперечном направлении движения. 1 — рама трафарета, 2 — подложка, 3 — стол станка, 4 — трафарет, 5 — рапель.

Последующее рассмотрение допусков, определяемых процессом печати, должно наглядно показать трудности соблюдения небольших допусков на погрешности геометрических размеров и взаимного расположения элементов печати. При печати сетка прогибается ракелем до соприкосновения с подложкой и испытывает обратимое удлинение, зависящее от положения ракеля (рис. 5.12, а). Растяжение сетчатого трафарета поперек движения ракеля почти не зависит от положения ракеля (рис. 5.12, б). Так как используют жесткие рамы, то воздействуют эти удлинения исключительно на трафарет, искажая в значительной степени рисунок схемы. Благоприятное воздействие оказывает упругое крепление трафарета (пневматическое натяжение, использование эластичных прокладок), а также такие размеры его, которые по сравнению с рисунком печатной платы относительно велики.

Относительное удлинение в направлении движения ракеля:

$$\frac{l_{\text{тр}}}{\alpha_{\text{тр}}^2} \cdot \Delta l_{\text{тр}} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 - \frac{l}{l_{\text{тр}}}} - \frac{1}{\frac{l}{l_{\text{тр}}}} \right) \text{ для } \frac{\alpha_{\text{тр}}}{l} \ll 1 \text{ и } \frac{\alpha_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}}} \ll 1$$

Относительное удлинение трафарета в поперечном направлении:

$$\frac{b_{\text{тр}}}{\alpha_{\text{тр}}^2} \cdot \Delta b_{\text{тр}} \approx 2 \frac{1}{1 - \frac{b_p}{b_{\text{тр}}}} \text{ для } \frac{\alpha_{\text{тр}}}{b_{\text{тр}} - b_p} \ll 1$$

$l_{\text{тр}}$ — длина трафарета, $b_{\text{тр}}$ — ширина трафарета, $\Delta l_{\text{тр}}$ — удлинение трафарета в направлении печати, $\Delta b_{\text{тр}}$ — удлинение трафарета в поперечном направлении, $\alpha_{\text{тр}}$ — зазор между подложкой и трафаретом, b_p — ширина ракеля.

При печати сетчатый трафарет вследствие силы трения, вызываемой движением ракеля, подвергается дополнительному растягивающему воздействию. Сила трения зависит от большого числа факторов (типа трафарета, открытой поверхности, вязкости пасты, твердости и заточки ракеля) и характеризуется удельным коэффициентом трения трафарета.

Исследования, проведенные в условиях производства, позволили установить относительные погрешности рисунка печатных плат

по сравнению с рисунком трафарета в продольном и поперечном направлениях (рис. 5.10):

$$\frac{l_{\text{р.и.}} - l_{\text{р.тр.}}}{l_{\text{р.тр.}}} = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}$$

где $l_{\text{р.и.}}$ — длина контрольного участка рисунка изделия; $l_{\text{р.тр.}}$ — длина контрольного участка рисунка трафарета.

Рассмотренные удлинения сетчатого трафарета оказывают большее влияние на погрешность взаимного расположения элементов рисунка изделия, чем на погрешность формы элементов рисунка. Величина, на которую расширяется при печати элемент рисунка изделия вследствие растекания пасты, зависит от следующих параметров:

- вязкости пасты, которая из-за испарения растворителя изменяется со временем;
- количества пасты,
- типа и толщины сетки,
- открытой площади поверхности трафарета по сравнению с его общей площадью;
- ширины печатных элементов;
- чистоты и шероховатости подложки;
- смачивающих свойств пасты на поверхности подложки.

Возникающие изменения позиционирования лежат в диапазоне от минус 0,1 до + 0,5 мм на метр длины.

5.4. Офсетная печать

Офсетная печать в производстве печатных плат и толсто пленочных изделий микроэлектроники используется для создания на металлизированных подложках тонких лаковых слоев, выполняющих роль резистов при травлении и гальванических процессах. В клише, несущее изображение схемы (проводники, контактные площадки), закатывается краска. Затем краска снимается с помощью офсетного валика, покрытого резиной, переносится на подложку и подвергается сушке при высокой температуре.

Клише и подложка располагаются друг за другом на основании машины для офсетной печати (рис. 5.13).

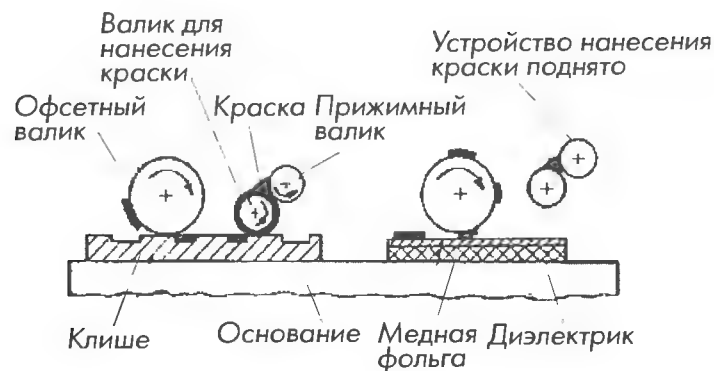


Рис 5.13. Схема офсетной печати.

Для изготовления клише маскируют методом фотопечати многослойную фольгу (например, 300 мкм Fe, 2 мкм Ni, 3...4 мкм Cu, 0,5...1 мкм Cr), биметаллическую фольгу (150 мкм Cu, 0,5...1 мкм Cr) или цинковые пластины, которые затем травят.

Офсетной печатью создаются слои толщиной не более 1 мкм, которые вследствие малой толщины часто содержат поры. Для повышения защитного действия слоеиспользуют многократную печать, однако при этом появляется опасность возникновения погрешностей контуров из-за погрешностей совмещения слоев. Иногда для закрытия пор применяют распыление специальных порошков (например, асфальтовый порошок) налипающих к еще не затвердевшей краске.

Точность печати и резкость контуров определяются параллельностью валиков, качеством покрытия валиков и особенно типом и консистенцией краски. Кроме того, на качество печати влияют и субъективные факторы, например установка прижимного усилия машины.

С помощью одного клише часто можно выполнить неограниченное число оттисков. Производительность метода ограничена скоростью перемещения валов (несколькими сотнями оттисков в час). Недостатками, из-за которых офсетная печать редко используется в производстве печатных плат и толсто пленочных изделий микроэлектроники, являются трудности получения беспористых слоев, высокая стоимость оборудования и необходимость использования квалифицированного обслуживающего персонала.

ГЛАВА 6

СИСТЕМЫ СОВМЕЩЕНИЯ

Проблемы совмещения начинаются уже с односторонних печатных плат, когда становится необходимым совместить позиционные положения отверстий и контактных площадок, окружающих эти отверстия. Естественные погрешности оборудования и неустойчивость размеров подложек, несущих топологию рисунка проводников, обуславливают отклонения от номинального положения элементов печатных плат, то есть к их рассовмещению. Все погрешности совмещения компенсируются соответствующими размерами контактных площадок так, что их размер тем больше, чем больше рассеивание положений элементов относительно узлов координатной сетки. Контактные площадки являются как бы подвижными мишенями для попадания в них сверлением, и для уверенного попадания в контактную площадку нужно иметь такой ее размер, чтобы она своим периметром окружала геометрическое место точек возможного местоположения сверления отверстий. Поэтому оценка точности производства сводится к размеру контактной площадки, который обеспечивает надежность попадания в нее отверстий без выхода за пределы ее периметра. Эту надежность попадания обеспечивает система совмещения элементов печатных плат.

6.1. Погрешности совмещения элементов межсоединений

6.1.1. Основные понятия о совмещении

Мы уже договорились, что одним из неперменных условий конструктивно-технологического обеспечения надежности соединений является правильно выбранный размер контактных площадок, исключающих опасность выхода за их пределы зоны сверлений

сквозных отверстий. Это условие состоит в том, что контактная площадка должна охватывать металлизированное отверстие, чтобы исключить торцевую связь проводника с металлизированным отверстием на ограниченной длине, соизмеримой или равной ширине проводника.

Если для односторонних и двусторонних печатных плат это условие можно проконтролировать визуально, то для внутренних слоев МПП это возможно только при использовании рентгена. Но и в этом случае высматривать такие дефекты — малонадежный и непроизводительный труд. Для МПП этот критерий конструктивно-технологического обеспечения надежности соединений обусловлен еще и тем, что связь торца контактной площадки внутреннего слоя МПП и металлизации отверстия не имеет прочного механического соединения и при температурных нагрузках и деформациях неизбежно рано или поздно порвется. Это всегда возможно, если контактная площадка не окружает отверстие на угол α более 180° , (рис. 6.1).

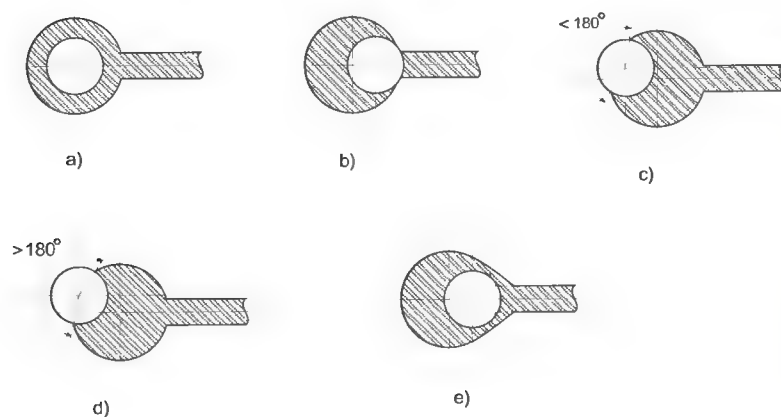


Рис. 6.1. Возможные варианты совмещения отверстий с контактными площадками: а) — идеальное совмещение, б) — ненадежное совмещение — рассовмещение, в) — заземление отверстия краями контактной площадки, угол $\beta > 180^\circ$, г) — отверстие вышло из заземления, угол $\beta < 180^\circ$.

Таким образом, задача конструктивно-технологического обеспечения надежности соединений состоит в расчете местонахождения геометрического места точек сверления отверстий на условно подвижном (деформируемом) основании, т.е. с учетом всех операционных погрешностей: на этапе изготовления фотошаблонов; сверления; погрешности, связанные с деформациями фотошаблонов и диэлектрических оснований; погрешности базирования; несимметричное травление элементов проводящего рисунка.

Наиболее актуально и полно эти погрешности проявляют себя в производстве МПП, поэтому анализ систем совмещения будем проводить применительно к МПП. Для односторонних и двусторонних печатных плат этот анализ упрощается из-за отсутствия соответствующих операций, вносящих погрешности совмещения, например, прессования, вызывающего сдвиг слоев, травления тонких слоев, следствием которого является их усадка, и т.д. Технологическое и производственное обеспечение надежности соединений заключается в контроле за соблюдением операционных допусков и оптимальных технологических режимов в заданных пределах на всех стадиях изготовления, в стабильности температурно-влажностного режима в производственных помещениях, ответственных за размерную стабильность фотошаблонов и тонких заготовок.

Перечисленные погрешности изготовления печатных плат складываются из:

- позиционных погрешностей, не зависящих от линейных размеров платы: погрешностей фотоплоттеров, систем базирования, сверлильных станков;
- линейно-зависимых погрешностей, связанных с деформацией оснований фотошаблонов и тонких фольгированных материалов слоев МПП или гибких печатных схем.

6.1.2. Математическая модель погрешностей совмещения

Наиболее подробно проблемы совмещения в производстве печатных плат рассмотрены в работах. В них производственные погрешности рассматриваются как случайные величины, описываемые вероятностными (теоретическими) и статистическими (экспериментальными) методами. Исчерпывающей характеристикой погрешности, как случайной величины, является закон распределения с конкретными значениями соответствующих параметров. Описанию

распределений производственных погрешностей наиболее соответствует закон Гаусса с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (-\infty < x < \infty), \quad (6.1)$$

где m и σ — математическое ожидание и средне-квадратическое отклонение.

Распределение Гаусса неоднократно подтверждалось экспериментальными данными в диапазоне значений, соответствующих размаху $\pm 3\sigma$. В соответствии с этим распределением, погрешность совмещения в конкретной точке ε_x в направлении X воспринимается как случайная величина, распределенная по нормальному закону, со следующими характеристиками:

$$\begin{aligned} m_{\varepsilon_x} &= m_{0x}X, \\ \sigma_{\varepsilon_x}^2 &= \sigma_{0x}^2 (x + 2r_x C_x^2), \end{aligned} \quad (6.2)$$

где r_x — коэффициент корреляции между величинами смещений соседних единичных участков в направлении X ; C_x^2 — число сочетаний из X по 2, рассчитываемое из выражения $C_x^2 = \frac{x(x-1)}{2!}$

Из соотношений (6.1 и 6.2) выводится аналитическая запись плотности вероятности распределения величин:

$$f\{\Delta_{m;x}\} = \frac{1}{A} \int_0^A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{0x}^2 X [1 + r_x (X-1)]}} \cdot \exp\left\{-\frac{(r_{Dx} - m_{0x}X)^2}{2\sigma_{0x}^2 X [1 + r_x (X-1)]}\right\} dX \quad (6.3)$$

Графики зависимости погрешностей совмещения от координат точек по одной оси, вытекающие из соотношения (6.3), показаны на рис. 6.2.

При наличии статистических данных могут быть найдены числовые характеристики распределения (6.3) для участка длиной L с шагом сетки h :

$$\begin{aligned} m_L &= m_{0x,1} \frac{L}{h} \\ \sigma_L^2 &= (\sigma_{0x,1})^2 \left(\frac{L}{h} + 2r_{x,1} C_{L/h}^2 \right) \end{aligned} \quad (6.4)$$

где M_L, σ_L — соответственно математическое ожидание и дисперсия деформации участка длиной L ; $C_{L/h}^2$ — число сочетаний из L/h по 2;

6.1.3. Позиционные погрешности

6.1.3.1. Случайные погрешности

Исходным этапом формирования печатной платы является процесс изготовления фотошаблона. Поскольку фотошаблоны изготавливаются обычно в относительно постоянных условиях, при изготовлении одного комплекта погрешности позиционирования элементов соединений на недеформируемой основе распределены по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю.

Сверление отверстий производится на координатно-сверлильных станках с ЧПУ с линейными приводами по осям X-Y или перемещением координатного стола с использованием системы винт-гайка с шаговыми приводами. Позиционные погрешности сверления распределены по нормальному закону. Предельные значения этих погрешностей, соответствующие трехкратным (3σ) или шестикратными (6σ) значениям среднеквадратического отклонения, являются основными паспортными характеристиками точности координатно-сверлильных станков. Влияние ряда причин, например нагрева ходовых винтов в процессе работы или нестабильности температуры в производственных помещениях, приводит к тому, что числовые характеристики погрешностей в реальном процессе нередко превышают паспортные величины.

Погрешности фиксации заготовок относительно фотошаблонов и обрабатывающего оборудования определяются выбранной системой базирования (совмещения) и точностью оснастки, определяемой вооруженностью инструментального производства. Погрешности базирования представляют собой систематические и случайные величины. В зависимости от качества исполнения устройств базирования и от квалификации оператора предельные значения этих погрешностей находятся в пределах $\pm (0,02 \dots 0,2)$ мм.

Сумма дисперсий позиционных погрешностей A_{Π} , представляющих независимые случайные величины с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием, равна

$$A_n^2 = \Delta_b^2 + \Delta_\phi^2 + \Delta_c^2, \quad (6.5)$$

где Δ_b , Δ_ϕ , Δ_c — дисперсии погрешностей оборудования и оснастки: базирования, позиционных погрешностей фотоплоттера (координатографа) и сверлильных станков соответственно.

6.1.3.2. Систематические погрешности

Эти погрешности в основном обусловлены системой базирования на всех операциях, где она используется. Они состоят из постоянной составляющей сдвига и углового разворота всех точек одной системы относительно другой. Они могут быть вызваны неточностью оператора при визуальном совмещении фотошаблона с заготовкой (для ДПП), погрешностью пробивки базовых отверстий, особенно если она производится оператором, повреждением или смещением реперных знаков, погрешностью установки заготовки на стол сверлильного станка, рассогласованием баз в комплекте фотошаблонов и на слоях, односторонним смещением слоев при прессовании и др.

Систематические погрешности при их выявлении, в отличие от случайных, могут быть устранены или, по крайней мере, сведены к минимуму (см. п. 6.1.5).

6.1.4. Линейно-зависимые погрешности

Линейно-зависимые погрешности дополняют позиционные погрешности и вызываются деформациями полимерной основы фотошаблонов и оснований тонких фольгированных диэлектриков.

При изготовлении и в процессе эксплуатации и хранения фотошаблонов изображение печатных элементов смещается из-за размерной нестабильности оснований, обусловленной влиянием фотохимической обработки, колебаний температуры и влажности окружающей среды. Количественная оценка размерной нестабильности подложек фотошаблонов выражается, как правило, в виде коэффициента относительной деформации.

Причинами деформации тонких фольгированных стеклотекстолитов принято считать напряжения, возникающие в диэлектриках в процессе его изготовления. При стративании фольги эти напряжения реализуют себя в деформациях диэлектрического основания.

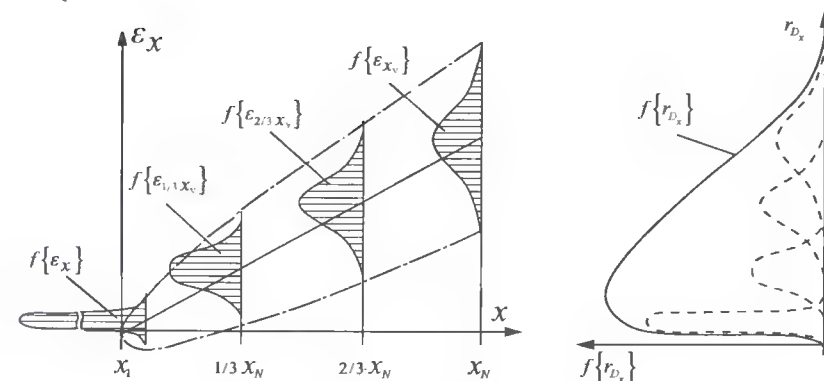


Рис. 6.2. Диаграмма погрешностей совмещения слоев в направлении X.

Разные участки равных размеров в пределах даже одного листа фотопленки или фольгированного материала деформируются неодинаково, величина их деформации может рассматриваться как случайная величина, имеющая нормальное распределение с математическим ожиданием m_l и дисперсиями σ_l^2 . Исследованиями установлено, что по мере увеличения расстояния печатных элементов от выбранного начала координат математическое ожидание смещения изменяется линейно, а дисперсия — параболически (рис. 6.2):

$$m_l = m_0 L;$$

$$\sigma_l^2 = \sigma_0^2 L^2,$$

где m_0 и σ_0^2 — математическое ожидание и дисперсия линейной деформации материалов, отнесенные к единице длины.

Так как печатные элементы примерно одинаково распределены по полю печатной платы, распределение расстояний от условного начала координат по всей длине печатной платы можно считать равновероятным, т. е. $f(l) = 1/L$. В этом случае характеристики m_l и σ_l^2 будут представлять собой функции случайной величины l .

Дисперсию ε^2 и математическое ожидание M суммарного распределения размерной нестабильности Δl по длине L получаем из

закономерностей нормального распределения, представляющих собой функции какого-либо доминирующего фактора:

$$M(\Delta_l) = M(m_l) = m_0 L/2; \quad (6.6)$$

$$\varepsilon^2(\Delta_l) = M^2(\sigma_l) + \varepsilon^2(m_l) + \varepsilon^2(\sigma_l); \quad (6.7)$$

$$M^2(\sigma_l) = 4\sigma_0^2 L^2; \quad (6.8)$$

$$\varepsilon^2(m_l) = m_0^2 L^2/12; \quad (6.9)$$

$$\varepsilon^2(\sigma_l) = \sigma_0^2 L^2/18; \quad (6.10)$$

$$\text{тогда } \varepsilon^2(\Delta_l) = m_0^2 L^2/12 + \sigma_0^2 L^2/2. \quad (6.11)$$

Достоверные значения параметров m_0 и σ_0^2 , определяются из статистических исследований деформаций материалов. Однако экспериментальные исследования достоверно характеризуют свойства лишь единичных образцов. Поэтому более целесообразно установить приближенные соотношения между числовыми характеристиками размерной нестабильности фотошаблонов и слоев МПП, рассчитываемыми по (6.6) - (6.11), и значениями коэффициента относительной деформации, определяемыми техническими условиями на материал. Указываемые в технической документации коэффициенты относительной деформации соответствуют, как правило, полю рассеивания 3σ . Это означает, что

$$m_0 = \alpha/2; \quad \sigma_0 = \alpha/6. \quad (6.12); (6.13)$$

Формулы для приближенного вычисления числовых характеристик распределения погрешности Δ_l получим, подставляя (6.12) и (6.13) в (6.6) и (6.11):

$$M(\Delta_l) = \pm L/4; \quad (6.14)$$

$$\varepsilon^2(\Delta_l) = (\alpha/2)^2 L^2/12 + (\alpha/6)^2 L^2/2 + 5 \alpha^2 L^2/144 \quad (6.15)$$

В результате значения линейно-зависимых погрешностей можно выразить следующим образом:

$$f(\Delta) = M(\Delta) \pm \sqrt{\varepsilon^2(\Delta)} = \frac{\alpha L}{4} \pm \sqrt{\frac{5\alpha^2 L^2}{144}}$$

6.1.5. Суммарные погрешности

Суммарное среднеквадратическое значение погрешности, вызванной размерной нестабильностью материалов, — линейно зависимость погрешности:

$$A_{\Sigma} = \sum M(\Delta_i) \pm \sqrt{\sum \varepsilon^2(\Delta_i)} = \frac{L}{4}(\alpha_\phi + \alpha_M) \pm \sqrt{\frac{5L^2}{144}(\alpha_\phi + \alpha_M)},$$

где α_ϕ и α_M — относительные деформации материалов фотошаблонов и материалов слоев, указываемые в соответствующих технических условиях или сертификатах.

Суммарная погрешность совмещения элементов соединений

$$A = \sum M(\Delta_i) + q \sqrt{\sum \varepsilon^2(\Delta_i) + A_{\Pi}^2} \quad (6.16)$$

где q — коэффициент вариации, связанный с неизбежными производственными дефектами производства и естественными причинами рассеивания.

Значения коэффициента q определяются долей допустимых дефектов n в общем числе N элементов соединений в печатной плате и определяются по таблице функции нормального распределения. В терминологии точности исполнения операций или для характеристики точности оборудования употребляются такие слова, как «три сигмы» или «шесть сигм». Они обозначают степень вероятности выхода какого-либо параметра за пределы установленных норм. Для примера в табл. 6.1 показаны вероятности ошибок или дефекта от выбранных значений кратности «сигма».

Таблица 6.1. Вероятность дефектов в зависимости от выбранных для расчета значений кратности «сигма» (коэффициента вариации).

Коэффициент вариации	Вероятность дефекта	Коэффициент вариации	Вероятность дефекта
Одна сигма	0,31731	Четыре сигмы	$6,3 \cdot 10^{-5}$
Две сигмы	0,04550	Пять сигм	$6,0 \cdot 10^{-7}$
Три сигмы	0,00269	Шесть сигм	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Это означает, что чем меньше мы собираемся допускать дефектов, тем больше вынуждены иметь размер контактных площадок или использовать оборудование и материалы, обеспечивающие большие точности и размерные устойчивости. При выборе вероятностей дефектов, соответствующих коэффициентам вариации пять и шесть сигм, мы переходим в область расчетов методом «минимума-максимума», т.е. сложением всех погрешностей без учета вероятности их благоприятного сочетания.

6.1.6. Размеры элементов совмещения

Условием надежности соединений является выполнение неравенства

$$0,5[D-(d+2b)] \geq A, \quad (6.17)$$

где D — размер контактных площадок; d — диаметр сверления отверстий под металлизацию; b — гарантированный пояска охвата отверстия контактной площадкой; A — суммарная погрешность (см. 6.16).

Условием размещения проектируемых трасс между сквозными металлизированными отверстиями является неравенство

$$pB + (p+1)C \leq T - D, \quad (6.18)$$

где p — число трасс печатных проводников, размещаемых между сквозными металлизированными отверстиями; B — номинальная ширина печатного проводника; C — номинальная ширина изоляционного зазора между печатными проводниками; T — шаг координатной сетки размещения сквозных металлизированных отверстий.

Размер контактных площадок выбирается из условия одновременного соблюдения неравенств, рассчитанных по (6.17) и (6.18).

Производственные погрешности находятся в строгой зависимости от технической оснащенности производства и линейных размеров печатных плат. Техническая оснащенность производства определяется составом оборудования и используемыми в производстве материалами. С этой точки зрения можно оценить современное производство характеристиками, приведенными в табл. 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2. Производственные погрешности

Характеристики погрешностей	Тип производства			
	1	2	3	4
Среднеквадратические отклонения погрешностей, мм:				
координатографов σ_k	0,012	0,005	0,003	0,002
фотоплоттеров σ_{ϕ}	0,015	0,015	0,012	0,010
оборудования для сверления отверстий σ_c	0,015	0,004	0,004	0,003
системы базирования σ_b	0,120	0,090	0,06	0,018
Относительные деформации, %:				
фототехнических материалов, b_{ϕ}	0,015	0,015	0,010	0,005
тонких базовых материалов (внутренние слои МПП), b_r	0,100	0,020	0,008	0,005

Таблица 6.3. Составляющие погрешностей базирования

Источники погрешностей базирования	Тип производства		
	1	2 и 3	4
Позиционные погрешности реперных знаков на фотошаблоне	0,023	0,012	0,004
Погрешности положения базовых отверстий на фотошаблонах относительно реперных знаков	0,015	0,006	0,003
Погрешности совмещения баз при экспонировании	0,010	0,005	0,003
Смещение координат базовых отверстий за счет деформации слоев после травления	0,012	0,008	0,006
Смещение координат базовых отверстий в результате прессования пакета слоев МПП	0,013	0,007	0,004
Погрешности базирования при сверлении	0,008	0,005	0,002
Суммарная позиционная погрешность базирования (Δ_b), мм	0,035	0,018	0,009
Среднеквадратическое отклонение (σ), мм	0,012	0,006	0,003

Результаты расчетов, проведенных на основании использования описанной математической модели в зависимости от линейного размера МПП (рис. 6.3), можно использовать для определения поля производственных погрешностей в сопоставлении с требованиями конструкторской документации с учетом соотношения (6.17).

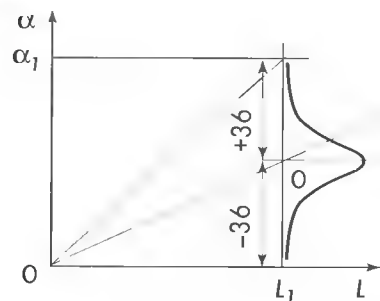


Рис. 6.3. Вариант распределения значений относительной деформации пленочных фотошаблонов или тонких слоев МПП, принятый для расчета по (6.12, 6.13)

На основании такого сопоставления можно сделать заключение о возможностях изготовления печатных плат по проектной документации в реальном производстве или определить реальное поле допусков для корректировки проекта применительно к данному производству или установить объем брака при изготовлении плат по представленному проекту. Вместе с тем сопоставление характеристик производственных погрешностей и их распределение по операциям позволяют получить правильное

представление о состоянии производства и сознательно планировать его модернизацию или реорганизацию.

6.1.7. Пример расчета конструкционных размеров

Исходные данные: габариты платы $L_x \times L_y = 233,3 \times 160$ мм; число трассируемых проводников между отверстиями $p = 2$; шаг отверстий $S = 2,54$ мм; диаметр металлизированных отверстий $d_m = 0,8$ мм; номинальная ширина проводников $B = 0,2$ мм; номинальная ширина изоляционных зазоров $C = 0,2$ мм; размер гарантированного пояса $b = 0,05$ мм; число металлизированных отверстий $N = 3500$; допустимое число дефектов $n = 3$; характеристика производства — тип 2.

6.1.7.1. Суммарные погрешности совмещения элементов соединений

Математическое ожидание деформации материалов:

$$\sum_i M(\Delta_i) = \frac{L}{4}(\alpha_\phi + \alpha_c) = \frac{280}{4}(1,5 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-4}) = 0,025 \text{ мм}$$

Дисперсия деформации материалов:

$$\sum_i \varepsilon^2(\Delta_i) = \frac{5L^2}{144}(\alpha_\phi^2 + \alpha_c^2) = \frac{5 \cdot 280^2}{144}[(1,5 \cdot 10^{-4})^2 + (2 \cdot 10^{-4})^2] = 0,00017 \text{ мм}^2$$

Дисперсия позиционных погрешностей:

$$A_{\Pi} = \Delta_b + \Delta_\phi + \Delta_c = 0,006^2 + 0,005^2 + 0,015^2 = 0,00028 \text{ мм}^2$$

Коэффициент вариации: $n/N = 3/3500 = 0,00086$; $q = 3,4$ (находится по таблице функции нормального распределения, например. Суммарно допустимая погрешность совмещения:

$$A = \sum_i M(\Delta_i) + q \sqrt{\sum_i \varepsilon^2(\Delta_i) + A_{\Pi}^2} = 0,025 + 3,4 \sqrt{0,00017 + 0,00028} = 0,097 \text{ мм}$$

6.1.7.2. Минимальный размер контактной площадки

Диаметр сверления:

$$d = d_m + 0,1 = 0,8 + 0,1 = 0,9 \text{ мм}$$

Диаметр контактной площадки, охватывающей отверстие:

$$D_{\min} = d + 2A + 2b = 1,0 + 2 \cdot 0,097 + 2 \cdot 0,05 \approx 1,3 \text{ мм}$$

6.1.7.3. Максимальный размер контактной площадки

$$D_{\max} = T - pa - (p + 1)C = 2,54 + 2 \cdot 0,2 + (2 + 1) \cdot 0,2 = 1,5 \text{ мм}$$

6.1.7.4. Выбор размера контактной площадки

Размер контактной площадки может находиться в диапазоне:

$$D_{\min} \leq D \leq D_{\max}. \text{ Выбираем } D = 1,4_{-0,05} \text{ мм}$$

6.1.7.4. Надежность соединения

Поле погрешностей:

$$A' = [(D - (d + 2b)) / 2] = [1,4 - (1,0 + 2 \cdot 0,05)] / 2 = 0,15 \text{ мм}$$

Реально получаемый коэффициент вариации:

$$q = \frac{A' - \sum_i M(\Delta_i)}{\sqrt{\sum_i \varepsilon^2(\Delta_i) + A_{\Pi}^2}} = \frac{0,15 - 0,025}{\sqrt{0,00017 + 0,00028}} = 5,9$$

Вероятность несовмещения элементов соединений P (вероятность ослабления элементов соединений из-за погрешностей совмещения) находим по табулированным функциям нормального распределения по коэффициенту вариации 5,9 и оно равно $P = 10^{-9}$.

6.2. Системы совмещения

6.2.1. Виды систем совмещения

Система совмещения (базирования) является одним из трех основополагающих факторов (два других: фотошаблоны, сверление), которым можно управлять для обеспечения совмещаемости топологий печатных плат. В зависимости от сложности печатной платы, объемов производства, номенклатуры и размеров заготовок выбираются различные системы базирования. Принципиально системы базирования можно разделить на 3 вида:

1. Визуальное совмещение фотошаблонов по реперным знакам (применяется в прототипном производстве, для плат ниже 4 класса) и/или изображений контактных площадок на фотошаблонах с отверстиями заготовки (часто применяется в производстве односторонних и двусторонних печатных плат).

2. Совмещение с использованием базовых отверстий и штифтов в различных конфигурациях

3. Автоматическое оптическое совмещение с использованием реперных знаков в той или другой форме.

До недавнего времени наибольшее распространение получили способы базирования по штифтам и базовым отверстиям (рис. 6.4).

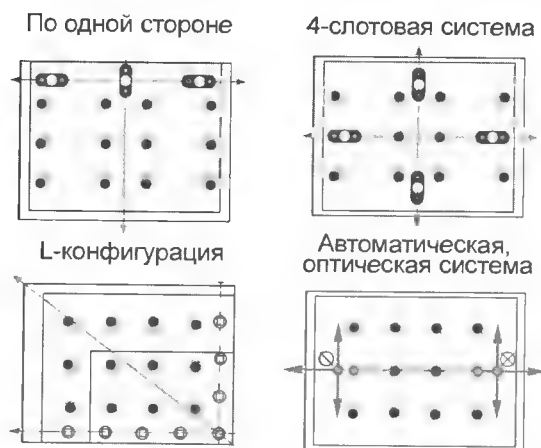


Рис. 6.4. Системы совмещения.

6.2.1.1. Размещение штифтов по одной стороне заготовки

— наиболее простой и универсальный способ размещения, который можно использовать при различных размерах заготовки. Недостатком этого метода является то, что погрешность совмещения усредняется только по одной стороне. Допустим фотошаблон имеет масштабные искажения, тогда рассовмещения отверстий и топологии около штифтов будет почти незаметным, а на противоположной границы может выйти за пределы допуска.

6.2.1.2. Четырехслотовая система

— следующий способ размещения штифтов, при котором слоты продолговатой формы, располагаются с четырех сторон заготовки. При таком размещении базирующих отверстий погрешности совмещения усредняются по двум координатам. Однако для каждого размера заготовки необходимо иметь свою прессформу и переналаживать устройство пробивки базовых отверстий.

6.2.1.3. L — конфигурация

— этот способ позволяет уменьшить воздействие точности получения базовых отверстий на точность совмещения. 8 штифтов квадратной формы расположены по двум сторонам платы, что делает этот способ универсальным. Для обеспечения большей точности, отверстия под штифты больше диагонали штифтов (зазор выбирают равным допуском на изготовление отверстий). Отверстия в фотошаблонах выполняют прямоугольной формы для предотвращения их растяжения или вспучивания.

Все три упомянутые системы используют для совмещения штифты, входящие в базовые отверстия.

6.2.1.4. Оптические системы совмещения

Принципиально новым решением проблемы совмещения является использование машинного зрения — автоматической оптической системы совмещения, в которой не используются штифты и базовые отверстия для совмещения. Пионером в создании такой системы явилась швейцарская фирма PRINTPROCESS.

6.2.2. Оценка систем совмещения

В табл. 6.5 оценены достоинства и недостатки систем совмещения.

Таблица 6.5. Достоинства и недостатки систем совмещения PIN-LAM и MASS-LAM.

Наименование системы совмещения	Преимущества	Недостатки
Штифтовые системы совмещения, PIN-LAM	По одной стороне	1. Усреднение отклонений идет по одной координате. 2. Необходимость пробивки овальных отверстий на заготовке. 3. Отсутствие статистики и непосредственных значений совмещения при выполнении операций. 4. Штифты не предотвращают сдвиг тонких слоев при прессовании
	4-х Слотовая система	1. Жесткая привязка к размеру заготовки и размеру прессформы. 2. Необходимость наличия прессформ различного размера. 3. Необходимость пробивки овальных базовых отверстий на заготовке. 4. Штифты не предотвращают сдвиг тонких слоев при прессовании 5. Отсутствие статистики и непосредственных значений совмещения при выполнении операций.
	I-Конфигурация	1. Отсутствие усреднения отклонений. 2. Простота фиксирования заготовки на раме чувствительна к точности сверления базовых отверстий на заготовке и колебанию толщины металлизации в отверстиях по определению, особенно при экспонировании защитной паяльной маски. 3. Отсутствие статистики и непосредственных значений совмещения при выполнении операций 4. Штифты плохо удерживают тонкие слои от сдвига при прессовании
Штифтовые системы совмещения, PIN-LAM	1. Гибкость при различных размерах заготовки.	
	1. Усреднение отклонений по двум координатам.	

Наименование системы совмещения	Преимущества	Недостатки
Оптическая, автоматическая система, MASS-LAM	1. Рекордно высокая точность совмещения.	
	2. Высокая производительность	
	3. Усреднение изменения размеров базовых ламинатов и фотошаблонов на всех этапах совмещения.	
	4. Гибкость в отношении размера заготовки.	
	5. Не требует базовых отверстий на фотошаблонах	
	6. Возможно применение стеклянных фотошаблонов.	
	7. Крепление пакета тонких слоев по периметру заготовки (бондажирование) предотвращает сдвиг слоев относительно друг друга	
	8. Легко автоматизируются технологические переходы при дальнейшей модернизации.	
	9. Наличие статистики реальных размеров при выполнении операций совмещения	
		1. Относительно большие капиталовложения при модернизации производства с уже установившейся системой совмещения.

6.2.3. Оптическая система совмещения

Принципы систем совмещения, использующих штифты и базовые отверстия, просты и хорошо известны. Оптические системы относительно новые. Принципы их работы основаны на использовании машинного зрения для распознавания и позиционирования реперных знаков на фотошаблонах, слоях, платах, так чтобы по ним совмещать топологии пространственных структур межсоединений.

Машинное зрение используется на всех этапах изготовления, где необходимы операции совмещения, начиная с экспонирования, продолжая в укладке пакетов слоев для прессования, формирования баз для сверления, использования реперных знаков для экспонирования внешних слоев и масочных покрытий.

Светокопировальная рама с оптической системой совмещения по реперным знакам совмещает фотошаблоны обеих сторон и, если

нужно совместить фотошаблоны с металлизированными отверстиями, совмещаются изображения реперных знаков двух сторон и базовых отверстий заготовки. Автоматическая светокопировальная установка позволяет избежать ошибок, связанных человеческим фактором. Оператор вкладывает в установку, в зону загрузки, заготовки внутренних слоев. Установка предварительно располагает и совмещает автоматически слои фотошаблонов с точностью 5 мкм. Экспонирование заготовки производится «холодным» УФ источником света, мощностью 1800 Вт. Мощность эффективной части спектра УФ излучения холодного источника, эквивалентна эффективной части УФ спектра обычного источника, мощностью 5000 Вт, что обеспечивает стабильную температуру поверхности фотошаблона и заготовки слоев.

После травления пакет слоев поступает на участок прессования. Совмещение происходит по вытравленным реперным знакам после усреднения изменения размеров слоев между реперными знаками. Размеры между реперными знаками слоев или заготовки платы записываются в память системы, т.е. попадают в статистику с идентификацией номера слоя и номера заготовки.

Скрепление слоев МПП в пакет для прессования производится либо склеиванием быстросхватывающимся клеем, либо сваркой за счет спекания препрега, либо склеиванием на специальной установке. Для этого слои укладываются в пакет, совмещаются по двум штифтам укладывается препрег; и после автоматизированного прижима, обеспечивающего планаризацию собранного пакета, проводится бондажирование по периметру. Стандартный шаг между точками крепления — 40 мм.

Сверление отверстий для склеивания пакета слоев производится прецизионным механизмом, обеспечивающим точность не хуже 15 мкм. Толщина пакета или спрессованной МПП может составлять от 0,05 мм до 6 мм.

Прессование МПП осуществляется без прессформ (без прессформы со штифтами), в результате чего достигается снижение напряжений в ламинированной заготовке, благоприятно сказывающееся на короблении и подвижке слоев. Во всяком случае, подвижка одинакова для всех слоев, что обеспечивает им лучшие условия совмещения.

После прессования заготовки МПП поступают на установку вскрытия реперных знаков путем фрезерования окна, в области их предполагаемого расположения. На установке с оптическим зрением,

после усреднения изменения размеров между реперными знаками, происходит сверление базовых отверстий, необходимых для последующей установки плат на столах сверлильных станков и фотолитографии наружных слоев и масок.

Данные по погрешностям совмещения вводятся в память машины на всех этапах производства, где используются положения реперных знаков.

6.2.4. Оценка точности систем совмещения

В работе проведен анализ точности совмещения при использовании штифтовых систем PIN-LAM. Доказано, что лучшая из них, система с L-конфигурацией штифтов и отверстий. Для сравнения систем PIN-LAM и MASS-LAM, ограничимся сопоставлением последней с L-конфигурацией. Для этого, в дополнение к результатам сравнения, приведенным в табл. 6.5, оценим параметры точности элементов совмещения, обеспечиваемые той и другой системами (6.5).



Рис. 6.5. Сравнение систем PIN-LAM и MASS-LAM

6.2.4.1. L-конфигурация (PIN-LAM)

Параметры точности:

- ± 30 мкм — точность позиционирования пленки,
- ± 18 мкм — воспроизводимость пробивки пленки,
- ± 10 мкм — точность штифтования пленки,
- ± 30 мкм — точность сверления,
- ± 12 мкм — точность совпадений слотовых отверстий,
- 8 слотов — базовых отверстий в L-конфигурации ($n = 8$),
- ± 80 мкм — сдвиг слоев при прессовании.

6.2.4.2. Автоматическая, оптическая система совмещения (MASS-LAM)

Параметры точности:

- ± 5 мкм — точность автоматического позиционирования фотошаблонов относительно технологических отверстий или реперных знаков,
- $\pm 7,5$ мкм — точность сверления технологических отверстий на специальной установке,
- ± 8 мкм — точность толщины меди,
- ± 30 мкм — точность сверления отверстий,
- ± 40 мкм — сдвиг слоев при прессовании.

6.2.4.3. Сравнение погрешностей

Обозначения:

- ΔF — погрешность совмещения на фотошаблоне,
- ΔP — погрешность позиционирования заготовки,
- ΔD — погрешность сверления отверстий заготовки используемых для базирования в раме экспонирования (для L-конфигурации),
- ΔC — точность совпадений базовых отверстий слотовой системы,
- ΔT — точность совмещения,
- ΔS — сдвиг слоев при прессовании

Точность совмещения для L-конфигурации:

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta F)^2 + (\Delta P)^2 + (\Delta D)^2 + (\Delta S)^2} = \sqrt{1324 + 1000 + 900 + 3600} = \pm 83 \text{ мкм}$$

Точность совмещения для MASS-LAM:

Центр оси базирования для оптической системы находится в центре заготовки, следовательно, погрешности, связанные с изменением размеров базовых материалов и фотошаблонов, будут уменьшаться вдвое:

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta F)^2 + (\Delta D)^2 + (\Delta S)^2} = \sqrt{25 + 56 + 1600} = 41 \text{ мкм}$$

Результат MASS-LAM-системы превосходит L-конфигурации более чем на 40 мкм у, не говоря уже о других PIN-LAM-систем.

Кроме того, в MASS-LAM-системе на операциях совмещения используется несколько серий базовых отверстий, привязанных к одной системе реперных знаков. Это позволяет компенсировать погрешности предыдущей операции в следующей операции технологического процесса. Приборная система регистрации результатов измерений позволяет накапливать статистику погрешностей совмещения, анализируя которую, можно находить их причины, как показано в п. 6.1.5.

6.3. Анализ погрешностей совмещения

6.3.1. Выделение составляющих погрешностей совмещения

Общая картина погрешностей гораздо сложнее описанной и может быть сведена к ограниченному перечню факторов, сказывающихся на точности совмещения, как показано на рис. 6.6. Погрешности совмещения элементов в каждой точке на плате можно представить в виде совокупности этих составляющих. Поскольку часть из них зависит от координат точек, погрешности совмещения будут меняться от точки к точке систематическим образом, по определенным зависимостям, которые будут размываться случайными составляющими.

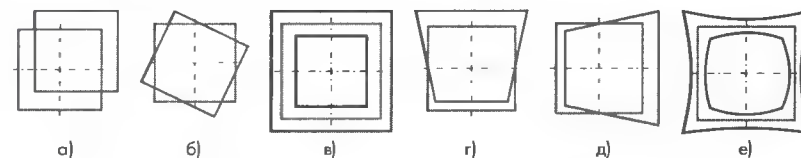


Рис. 6.6. Составляющие погрешностей совмещения: а — сдвиг, б — угловой разворот, в — растяжение, сжатие, г и д — трапецевидность, е — листорсия.

Можно выделить отдельные составляющие в массиве измеренных значений координат точек элементов совмещения и определить группы факторов, которые вносят наибольший вклад в формирование погрешностей совмещения. Количественная оценка этих составляющих служит основой для оптимизации процессов совмещения: коррекции позиционирования заготовок на столах обрабатывающего оборудования, юстировки оснастки, выбора контрольных точек для управления точностью совмещения и т.д.

В общем случае можно выделить ряд очевидных причин рас-совмещений, как показано в табл. 6.4. В практике производства при-чины, лежащие на поверхности, выявляются легко и быстро. Слож-нее обстоит дело с многофакторными причинами, с примерно оди-наковой весомостью каждого фактора. Поэтому важно иметь и ис-пользовать модель, позволяющую выделить наиболее значимые факторы, сказавшиеся на потере точности совмещения. В работе предложена модель, состоящая в декомпозиции массива измерен-ных координат элементов совмещения на отдельные составляющие, соответствующие различным группам действующих факторов в об-щей системе совмещения.

Таблица 6.4. Источники погрешностей совмещения

Составляющие погрешностей совмещения	Причины возникновения
Систематические составляющие позиционных погрешностей – погрешности смещений координатных систем	$\Delta x_0, \Delta y_0, \alpha_x, \alpha_y$ • Погрешности оператора при визуальном совмещении фотошаблона с заготовкой (для ДПП) • Погрешности пробивки базовых отверстий • Повреждения реперных знаков • Погрешности установки заготовки на стол сверлильного станка • Рассогласование баз в комплекте фотошаблонов и на слоях • Одностороннее смещения слоев при прессовании • Систематические погрешности сверлильных машин и фотоплоттеров
Деформации носите-лей топологии: фотошаблонов, слоев	μ_x, μ_y • Нестабильность температуры • Нестабильность влажности • Температурные деформации при экспонировании • Разнонаправленные сдвиги слоев при прессовании: несоблюдение направ-ления раскрытия материалов по утку и основе, нестабильность материала препрега, неравномерный нагрев (горячие и холодные «пятна») и др.

6.3.2. Модель разделения погрешностей

Модель использует три параметра погрешностей совмещения для каж-дой оси координат:

- сдвиг одной системы координат относительно другой: $\Delta x_0, \Delta y_0$;
- угловой разворот одной системы относительно другой: α_x, α_y ;
- деформации основы – масштабные искажения: μ_x, μ_y .

Тогда рассовмещение в каждой конкретной точке с координатами X_i и Y_i можно представить в виде:

$$\Delta x_i = \Delta x_0 + b_x Y_i + \mu_x X_i$$

$$\Delta y_i = \Delta y_0 + b_y X_i + \mu_y Y_i$$

Применяя метод наименьших квадратов, можно находить по мас-сиву рассовмещений в различных точках параметры $\Delta x_0, \Delta y_0, b_x, b_y, \mu_x, \mu_y$. Так, по оси X:

$$\Delta x_0 = \left(\sum_{i=1}^n \Delta x_i / n \right) - \alpha_x \bar{Y} - \mu_x \bar{X},$$

$$\alpha_x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i (Y_i - \bar{Y}) / \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2,$$

$$\mu_x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i (X_i - \bar{X}) / \sum_{i=1}^n \Delta x_i (X_i - \bar{X})^2$$

где X_i и Y_i – координаты i -й точки, $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ редние значения координат X и Y всех точек.

Аналогично для оси Y:

$$\Delta y_0 = \left(\sum_{i=1}^n \Delta y_i / n \right) - \alpha_y \bar{X} - \mu_y \bar{Y},$$

$$\alpha_y = \sum_{i=1}^n \Delta y_i (X_i - \bar{X}) / \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2,$$

$$\mu_y = \sum_{i=1}^n \Delta y_i (Y_i - \bar{Y}) / \sum_{i=1}^n \Delta y_i (Y_i - \bar{Y})^2$$

Предложенная модель позволяет провести декомпозицию из-меряемых погрешностей и выделить параметры (координатные сме-щения, разворот, масштабные погрешности), происхождение кото-рых на ключевых этапах технологического процесса может быть

идентифицировано. Это позволяет определять доминирующие причины возникновения погрешностей совмещения. Помимо этого, модель дает возможность не только определять погрешности совмещения, привносимые на конкретном этапе производства платы, но и в дальнейшем корректировать параметры оборудования или технологического процесса, уменьшать их до приемлемого уровня.

6.4. Управление совмещением в производстве

6.4.1. Подготовка информации

Одним из важных этапов производства печатных плат является этап подготовки информации. Именно на этом этапе должны быть определены все технологические особенности печатной платы, заданы все допуски и требования к технологическому процессу.

6.4.1.1. Общие меры

Подготовка информации начинается с импорта данных из различных САПР проектирования печатных плат. После получения платы из САПР проектирования (CAD программы) проводятся несколько тестов данных, для проверки их совместимости с существующим технологическим процессом. Основным тестом является тест DRC (Design Rules Test — тест на проверку выполнения производственных допусков). Тест DRC включает:

- проверку зазоров между проводниками, контактными площадками и полигонами;
- проверку минимального кольца между контактными площадками, отверстиями и паяльной маской;
- наличие паразитных отверстий или контактных площадок;
- минимальную толщину проводников;
- минимальный размер контактной площадки;
- специальные тесты (металлизированное отверстие без контактной площадки, контактные площадки без отверстий, расстояния между установочными отверстиями и элементами платы).

После проведения этих тестов необходимо провести коррекцию данных печатной платы. Зачастую, проектировщики нерационально устанавливают правила трассировки печатных плат. При этом,

значительно увеличивается вероятность выхода отверстия за границу контактной площадки (возникновение критического рассовмещения). В большинстве случаев, достаточно увеличить размеры контактных площадок на всей плате, в пределах обеспечения допусков, на расстояние между элементами платы. Иногда возможна оптимизация расположения проводников на печатной плате для обеспечения менее жестких требований по совмещению.

6.4.1.2. Изменение формы контактных площадок

Следующим правилом для обеспечения работоспособности платы при возникновении погрешностей совмещения является добавление каплевидности контактных площадок, содержащих внутри отверстия (рис. 6.7).



Рис. 6.7. Придание каплевидности к форме контактных площадок, окружающих отверстия.

Эта мера позволяет снизить вероятность брака, в случае смещения отверстия в наиболее критичном направлении (в сторону отходящего проводника). Т.к. при смещении в другом направлении (для комбинированного позитивного метода), даже при небольшом выходе отверстия за контактную площадку, плата будет признана годной.

6.4.1.3. Формирование групповых заготовок

Почти всегда печатная плата после проектирования имеет замкнутый контур (границу печатной платы, по которой, в дальнейшем, должно пройти фрезерование контура). При мультиплицировании платы на групповую заготовку, этот контур необходимо разбить на малые элементы в углах, так как, в противном случае, контур будет служить искусственно созданным заслоном для равномерного движения смолы и выхода газов.

6.4.1.4. Формирование технологического контура

В задачи технологического контура (технологического поля) входит.

- придание рабочему полю устойчивости к изменению геометрических размеров при создании проводящего рисунка внутренних слоев;
- повышение жесткости спрессованной заготовки;
- защита базовых отверстий от смещений;
- предотвращение свободного выхода смолы в момент гелеобразования, иначе край печатной платы будет истощен склеивающим веществом и, как следствие, произойдет уменьшение толщины по краям платы.

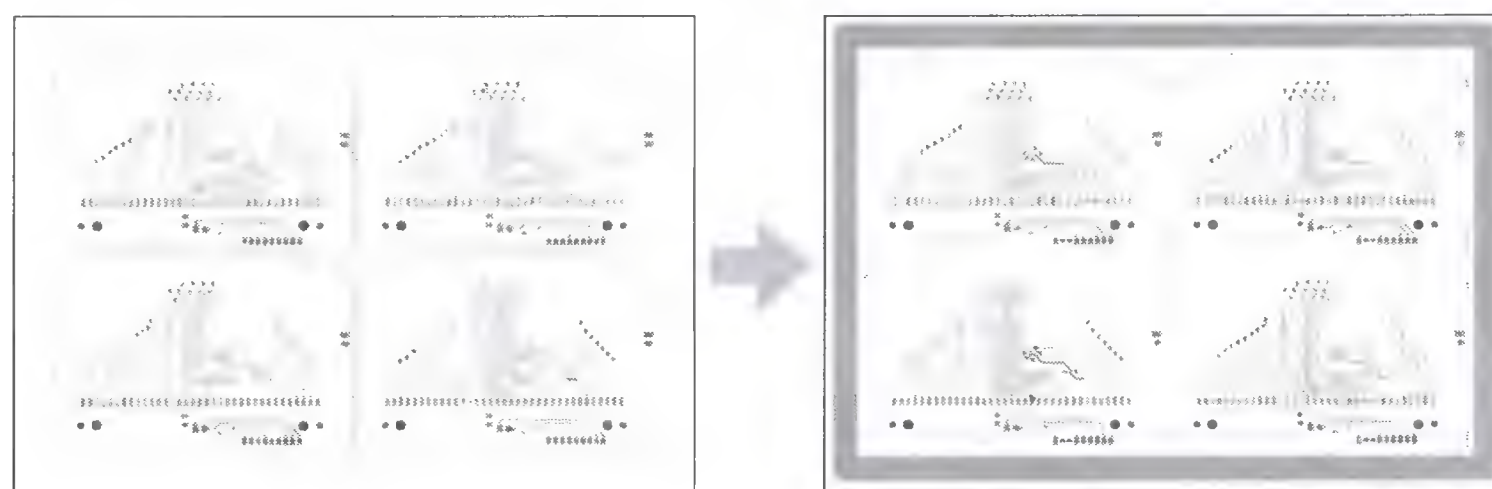


Рис.6.8. Технологический контур платы

Технологический контур не следует делать сплошным, лучше его разрядить выполнением рисунка в виде «зебры». Причем направление линий «зебры» нужно чередовать так, чтобы они перекрещивались в проекциях разных слоев. Такая конструкция технологического поля будет обеспечивать устойчивость размеров заготовок и давать возможность выхода летучих при прессовании.

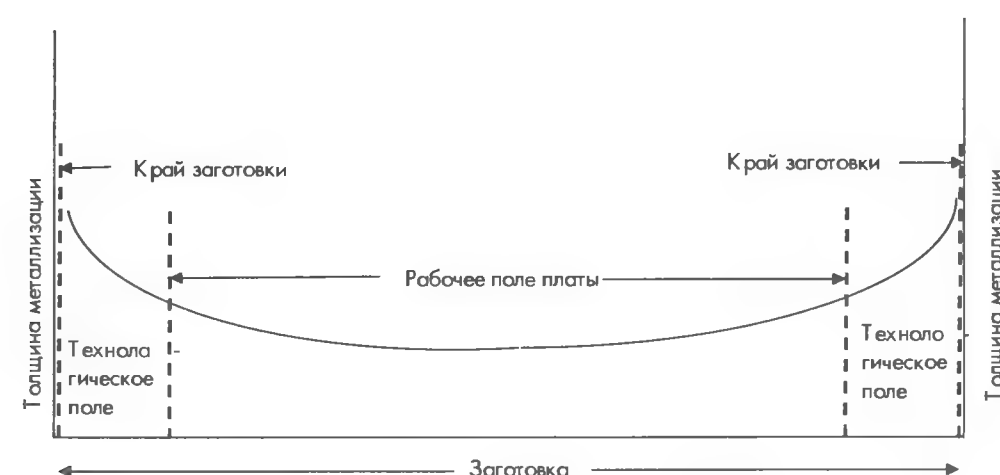


Рис. 6.9. Неравномерность металлизации заготовки от краев к центру

Обеспечение этих требований (рис. 6.8) улучшит условия совмещения слоев МПП при прессовании.

Размер технологического поля по технологическому контуру определяется необходимостью компенсации неравномерности металлизации и создания упора для вытекания смолы при прессовании МПП (рис.6.9).

6.4.1.5. Симметрирование слоев МПП

Для предотвращения коробления необходимо обеспечить симметричность слоев относительно общей оси симметрии печатной платы. Симметричность подразумевает сбалансированность металлизации на симметричных слоях платы (Рис. 6.10).

Если в конструкции предусмотрено применение разных по толщине базовых материалов, то они должны иметь аналог при зеркальном отображении относительно оси симметрии. Так же необходимо компенсировать различие в площадях металлических областей заготовок. Эти компенсации производятся на этапе подготовки информации.

Точно так же следует учитывать толщину стеклоткани в основаниях и препреге: большие толщины стеклянных нитей приводят к уходу сверл, что сильно сказывается на совмещении элементов. Непременное условие большой точности позиционирования при сверлении использование стеклотканей с тонким переплетением, т.е. с тонкими стеклянными нитями.

6.4.2. Изготовление фотошаблонов

С фотошаблонов начинается точность получаемого рисунка. На этом этапе начинается масштабные искажения рисунка. Для снижения вероятности возникновения критических погрешностей совмещения целесообразно производить выборочный или полный контроль фотошаблонов (в зависимости от объема партии).



Рис.6.10. Заготовка печатной платы в момент прессования

Применяемые в настоящее время методы контроля фотошаблонов включают визуальную оценку (наличие контактных площадок, проводников, нужных зазоров) и измерение геометрических размеров фотошаблона, с контролем точности позиционирования элементов.

Измерение геометрических параметров фотошаблона связано либо с использованием точного измерительного оборудования (обеспечивающего высокую точность на большой длине) либо использованием эталонного шаблона. При использовании эталонного фотошаблона, точность измерений зависит от точности совмещения эталонного и измеряемого фотошаблона.

6.4.3. Сверление отверстий

6.4.3.1. Общие меры предотвращения смещения

Для обеспечения точности сверления отверстий необходимо соблюдать следующие требования:

- использовать прижим при сверлении;
- подбирать оптимальные режимы сверления;
- использовать надплатники при сверлении, которые обеспечивают центрирование сверла;
- не рекомендуется сверлить одновременно более трех плат, при пакетной обработке;
- для достижения максимальной точности сверлильного оборудования, не рекомендуется использовать пакетную обработку печатных плат (обрабатывать одновременно больше одной платы), т.к. при сверлении пакета плат, происходит увод сверла из-за неоднородности стеклотекстолита;
- своевременно производить очистку направляющих и рабочей плоскости станка, т.к. попадание стружки в направляющие приводит к случайным погрешностям сверления;
- проводить регулярный контроль координатной точности станка и корректирование коэффициентов масштабной компенсации.

6.4.3.2. Корректирование масштабной компенсации

Вследствие износа рабочих механизмов сверлильного станка, в процессе его работы могут возникать систематические погрешности.

Большинство САУ этих станков позволяет корректировать масштабные искажения станка. Поэтому, для обеспечения точности изготовления отверстий производится аттестация оборудования, заключающаяся в нахождении текущих значений масштабных искажений и внесении соответствующих корректирующих искажений.

Одним из методов является прямое измерение получаемых размеров. Для этого создается тестовая программа сверления серии отверстий. Затем производится измерение реального расстояния между отверстиями. Разделив реально полученное расстояние на заданное в программе вычисляются коэффициенты масштабной компенсации для двух осей станка. Для реализации, этого метода, необходимо точное измерительное оборудование, позволяющее производить измерения больших расстояний (до 1 м) с точностью, большей, чем точность позиционирования сверлильного станка (6.11).

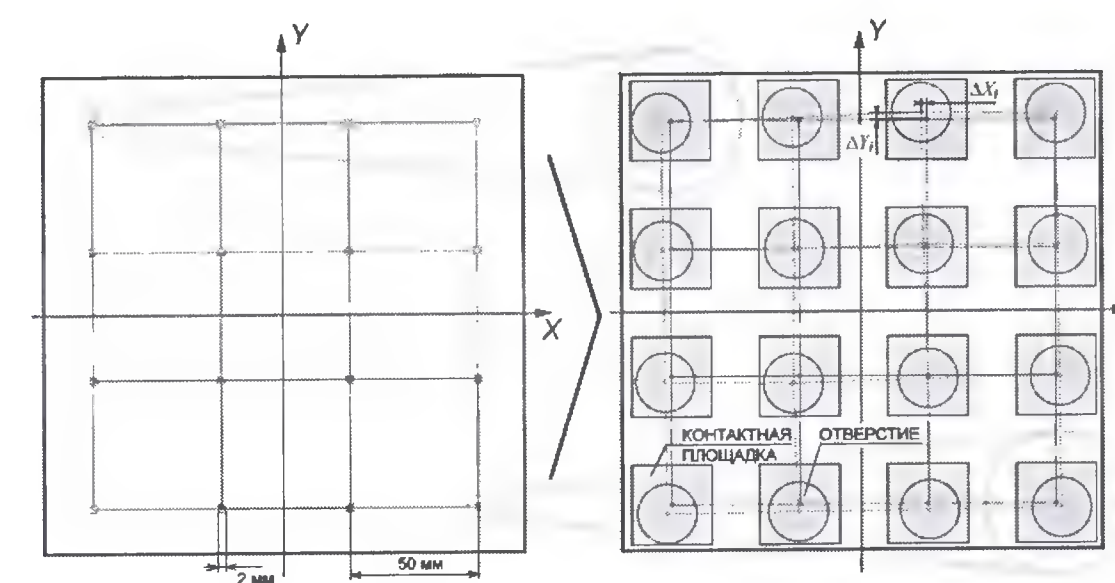


Рис. 6.11. Аттестация оборудования для сверления печатных плат

Использование математической модели погрешностей совмещения (см. п. 6.3.2) позволяет упростить аттестацию сверлильного оборудования. Сравнение просверленной платы с эталоном (эталонным шаблоном) и измерение рассовмещений в нескольких зонах на рабочем поле позволяет с минимальными затратами времени выделить основные виды погрешностей оборудования:

- Масштабные погрешности
- Неортогональность осей двухкоординатного стола
- Случайные погрешности

Преимущество этого метода заключается в том, что для его реализации не требуется оборудование, обеспечивающее высокую точность измерений на большой длине.

6.4.4. Прессование

Прессование — наиболее сложный технологический процесс в производстве многослойных печатных плат. На этом этапе могут возникать смещения, масштабные искажения слоев, коробление печатной платы и т.д.

6.4.4.1. Обеспечение симметричности конструкции платы, подбор базовых материалов

Как уже указывалось в п. 6.4.1.5, конструкция многослойной печатной платы должна быть симметричной. Если в конструкции предусмотрено применение различных по типу базовых материалов, то они должны иметь аналог при зеркальном отображении, относительно оси симметрии. Также важно правильно выбрать однородные прокладочные стеклоткани (препрег) и оснований слоев. Суммарная толщина препрега должна быть, по крайней мере, вдвое больше суммарной толщины (высоты) проводников на соприкасающихся слоях.

Из рис. 6.11 видно, что в процессе движения смолы ей противостоят ячеистая структура стеклоткани, поверхность и торцы проводников. Неравномерное нанесение связующего может привести к тому, что при прессовании по всей поверхности платы произойдет частичное смещение печатных проводников, а на наружных слоях могут даже образоваться складки. Поэтому важно обеспечить симметричное расположение связующих и материалов оснований.

6.4.4.2. Направление волокон стеклоткани

В процессе изготовления стеклотекстолита, стеклоткань раскатывается из рулонов, и склеивается эпоксидной смолой. Кроме того, что стеклоткань анизотропна по утку и основе переплетений, при раскатке из рулона (рис. 6.12) она испытывает продольные нагрузки, вследствие чего коэффициенты растяжения в продольном и поперечном направлениях оказываются различными (в продольном направлении меньше). Направление раскатки, совпадающее с направлением основы, обычно маркируется специальными метками. При прессовании, если расположить основы одинаково ориентированно, относительно меток, деформация заготовки МПП в одном направлении будет выше, чем в другом. Поэтому рекомендуется укладывать пакет

слоев и препрега относительно взаимно-перпендикулярно (или под углом 45°) по направлению основы (рис. 6.13-б).

6.4.5. Обеспечение стабильности окружающей среды

Во избежание деформаций базовых материалов (стеклотекстолита, препрега) и фотомасштабов, линейной стабильности оборудования

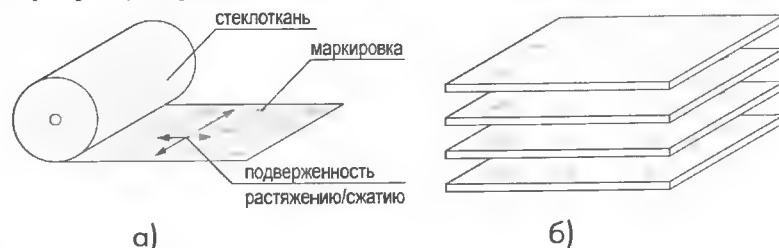


Рис. 6.12. Учет направления нитей стеклоткани при укладке пакета слоев и препрега: а — раскатка стеклоткани; б — ориентация слоев и препрега при прессовании.

(фотоплоттеров, установок экспонирования, столов для укладки пакетов слоев, сверлильных станков и т.д.) требуется обеспечивать стабильность параметров окружающей среды (температуры и влажности): по температуре — $21 \pm 2^\circ\text{C}$, по влажности — $55 \pm 5\%$.

ГЛАВА 7

ПРОЦЕССЫ ПЕЧАТИ

7.1. Введение

Распространенной технологической операцией в производстве печатных плат узлов является травление. Под этим понимают химическое растворение материала под действием жидких травящих растворов или активированных газов (плазмохимическое травление). Продукты реакции в общем случае удаляются благодаря подвижности растворов. Собственно химическое травление часто сочетают с механическим воздействием, например, давлением струй травящего раствора. В зависимости от морфологии открытой поверхности химическое травление может быть выравнивающим (полирующим, шлифующим) и избирательным (селективным). При выравнивающем травлении происходит сглаживание рельефа поверхности, уменьшение его шероховатости, при избирательном — увеличение шероховатости поверхности за счет неоднородности ее структуры (микротравление). Травление через окна защитной химически стойкой маски, получаемой известными методами печати, или металлорезиста получают топологический рисунок печатной платы или перфорации в металлических листах (фотохимическое фрезерование), или клише на плоской поверхности металла и т.д. Таким образом травление применяется для:

- создания металлического рисунка проводников на диэлектрическом основании (рисунок печатных плат);
- развития поверхностей, придания ей шероховатости для улучшения адгезии наслаиваемых на нее слоев;
- создания мельчайших отверстий (апертур) в металлической фольге при изготовлении трафаретов, масок и фильтров;

- изготовления сложных профильных деталей из тонкой жести и металлической фольги (профильное травление);
- активации поверхностей путем травли окисных и загрязняющих слоев;
- создания определенного рельефного рисунка на поверхности.

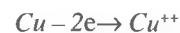
Наиболее часто технология травления применяется для создания проводящего рисунка печатной платы. При этом до 70% металлического слоя, нанесенного на диэлектрик, удаляется, а участки, которые нужно оставить, защищают резистами: металлическими — металло-резистами, или фотополимерными — фоторезистами, или специальными красками, химически устойчивыми к травящим растворам. Чаще всего травлению подвергают металлы: медь и ее сплавы, олово и его сплавы, реже никель и его сплавы, еще реже другие металлы такие, как хром, алюминий, нержавеющая сталь. Кроме того, в производстве электронных компонентов приходится травить полупроводниковые материалы (Si, Ge) и диэлектрические слои (как правило, SiO_2).

Наряду с использованием всевозможных резистов (красок, фоторезистов, металлорезистов) в технике прецизионного травления используется дифференциальное травление, т.е. вытравливание тонких слоев металла из пробельных мест, при котором «толстые» проводники лишь незначительно уменьшают свое сечение. Например, в полуаддитивном методе толщина меди в зазорах между проводниками — не более 5 мкм, толщина проводников — 30...35 мкм, толщина металлизации в отверстиях — 25...30 мкм. Как видно, при травлении слоя меди в 5 мкм на рисунке и в отверстиях останется достаточно металла, чтобы обеспечить работоспособность печатной схемы.

7.2. Химические принципы процессов травления

7.2.1. Электрохимический ряд напряжений металлов

В соответствующих растворителях металлы растворяются: отдают электроны, образуя положительно заряженные ионы, например:



Ответим на два вопроса: $[Cu(CN)_2]^{--}$

Как между поверхностью металла и растворителем возникает необходимая для растворения разность потенциалов?

Какие вещества являются окислителями — принимают электроны?

Тенденцию к растворению металлов можно выразить через разность потенциалов металла и раствора по отношению к электроду сравнения. Если в качестве электрода сравнения используют равновесный водородный электрод, а противоположным электродом является металл, помещенный в 1 М раствор своих ионов, то получают стандартный потенциал. Стандартные потенциалы металлов E_0 сведены в так называемый электрохимический ряд напряжений металлов (табл. 7.1). Чем больше разница потенциалов рассматриваемого металла E_0 относительно другого в отрицательную сторону, тем активнее этот металл растворяется в среде раствора другого металла. Количественно этот процесс описывается уравнением Нернста:

$$E = E_0 - \frac{RT}{ZF} \ln C \quad (7.1)$$

где E — электродный потенциал; E_0 — стандартный электродный потенциал; C — концентрация ионов металла; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; Z — валентность ионов металла; F — постоянная Фарадея.

Если в уравнении (7.1) подставить постоянные, то для комнатной температуры получим

$$E = E_0 - \frac{0,058}{Z} \ln C$$

Таблица 7.1. Электрохимический ряд напряжений металлов

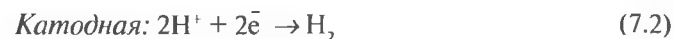
Электрод	Нормальный потенциал, В	Электрод	Нормальный потенциал, В	Электрод	Нормальный потенциал, В
Au/Au ⁺	+ 1,70	Fe/Fe ³⁺	−0,036	Ga/Ga ³⁺	−0,53
Ag/Ag ⁺	+ 1,50	Pb/Pb ²⁺	−0,126	Cr/Cr ³⁺	−0,74
Pd/Pd ²⁺	+ 0,987	Sn/Sn ²⁺	−0,136	Zn/Zn ²⁺	−0,763
Ag/Ag ⁺	+ 0,7991	Ni/Ni ²⁺	−0,250	Mn/Mn ²⁺	−1,18
Hg/Hg ²⁺	+ 0,789	Co/Co ²⁺	−0,227	Zr/Zr ⁴⁺	−1,53
Pb/Pb ⁴⁺	+0,650	In/In ³⁺	−0,342	Ti/Ti ²⁺	−1,63
Cu/Cu ⁺	+ 0,521	Cd/Cd ²⁺	−0,403	Al/Al ³⁺	− 1,66
Cu/Cu ²⁺	+ 0,337	Fe/Fe ²⁺	−0,440	Mg/Mg ²⁺	−2,37
H ₂ /H ⁺	0			Na/Na ⁺	−2,714

7.2.2. Принципы травления металлов

Известны три принципа травления металлов.

7.2.2.1. Травление с выделением водорода.

В неокисляющей кислоте металл в приповерхностном слое образует катионы и электроны. Как следствие, на поверхности возникает двойной электрический слой, препятствующий дальнейшему растворению металла. Но если электроны поглощаются раствором, то растворение металла продолжается. При этом протекают реакции:



По ходу поляризационных кривых (рис. 7.1) можно проследить протекающие процессы. Поскольку обе реакции характеризуются одинаковыми плотностями тока, то система находится в равновесии. Чем больше плотность тока i , определяемая концентрацией ионов металла, тем интенсивнее процесс травления. Из равенства (7.1) можно оценить влияние концентрации ионов водорода на процесс травления:

$$E_{\text{H}_2} = \% 0,058 pH,$$

где pH — концентрация ионов водорода в растворе травления.

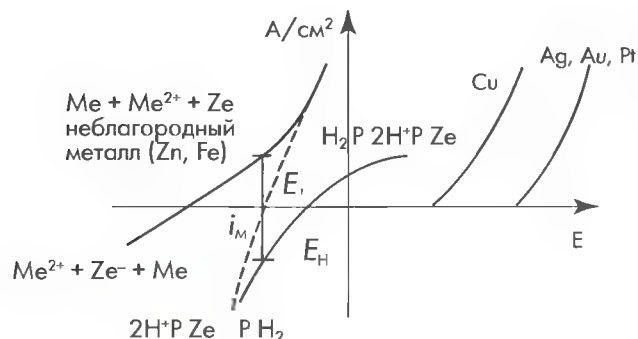


Рис. 7.1. Поляризационные кривые растворения металла с выделением водорода: E_H — стандартный потенциал; i_M — плотность тока при E_H ; E_1 — равновесный потенциал.

Большей концентрации ионов водорода соответствует увеличение плотности тока i_M , определяемой потоком ионов металла, и, соответственно, увеличение эффективности процесса травления (рис. 7.3).

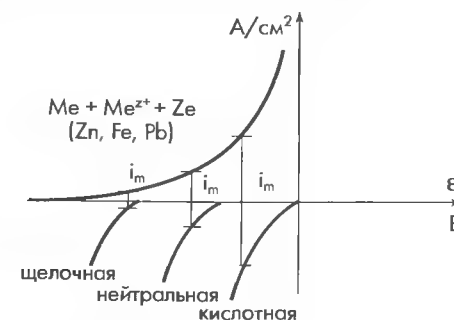


Рис. 7.2. Влияние концентрации ионов водорода на плотность тока i_M

7.2.2.2. Травление с восстановлением кислорода

Металлы, потенциал которых положительнее водородного, не могут растворяться по первому принципу, так как не возникает равновесия в системе (рис. 7.2). Эти металлы разрушаются в травящих растворах, поглощающих электроны вследствие восстановления кислорода (рис. 7.3), а именно:

в кислых растворах:



в щелочных растворах:

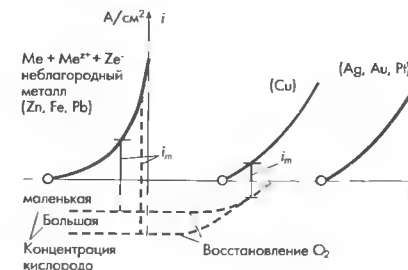
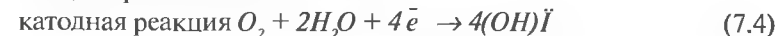
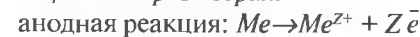


Рис. 7.3. Поляризационные кривые растворения металла с восстановлением кислорода.

С увеличением концентрации ионов кислорода интенсивность растворения металла усиливается. Вследствие этого травители металлов с большим электрохимическим потенциалом (благородных металлов) должны содержать окислители или вещества, образующие кислород при вторичных реакциях. Наиболее эффективными в этом являются азотная, хромовая или янтарная кислота, хлорное железо, перекись водорода, соли персульфатов и соли меди.

7.2.2.3. Травление с образованием комплексов.

Эффективный метод, обеспечивающий растворение благородных металлов, описывается уравнением Нернста (7.1). Благодаря снижению концентрации ионов металла потенциал сдвигается в отрицательную сторону, что приводит к возникновению катодных реакций (7.2) – (7.4). Уменьшение концентрации ионов благородных металлов достигается благодаря добавкам к травителю комплексообразователей, например цианидов или аммиака (аммиачный комплекс хлорной меди), которые связывают ионы благородных металлов в комплексы с наибольшей степенью диссоциации. На рис. 7.4 наглядно показан принцип происходящих процессов графиками поляризации применительно к травлению металлов.

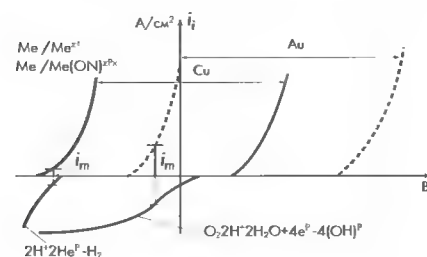


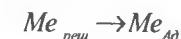
Рис. 7.4. Поляризационные кривые травления благородного металла с образованием комплексов.

7.2.2.4. Понятия о перенапряжениях

Все предыдущие выкладки на тему растворения металлов базировались на том, что эти процессы определяются только электрическими факторами. Однако в действительности это не так. Существуют явления, которые электрические процессы растворения металлов ускоряют, сдерживают или полностью прерывают. Эффекты, сдерживающие электрохимический процесс, объединены понятием перенапряжения.

Например, свинец стоит в электрохимическом ряду напряжений выше водорода, однако, он не вытесняет водород из соляной и серной кислот, вследствие перенапряжений. Это даже позволяет использовать его в качестве нейтральных анодов в кислых электролитах.

Кристаллизационное перенапряжение проявляется при переходе атомов металла из кристаллической решетки в водные травящие растворы. Реальная поверхность металлов (например, из-за различной ориентации граней кристаллов) обладает определенной шероховатостью. Поверхностные атомы имеют существенно меньшую энергию связи, чем внутренние (рис. 7.5). Например, атомы металла с кубической гранецентрированной решеткой $Me_{\text{реш}}$, занимающие полукристаллическое положение, вначале не переходят в раствор, а адсорбируются поверхностью металла $Me_{\text{ад}}$, обладающего многочисленными свободными силами связи:



И чем меньшими связями обременены атомы на поверхности металла, тем легче они переходят в раствор.

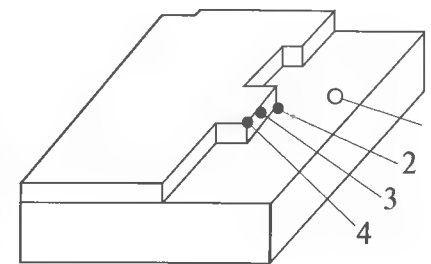


Рис. 7.5. Реальная поверхность металла. Внутренние атомы (1) обладают двенадцатью связями с соседними окружающими их атомами; атомы на ребре (2) — девятью связями; атомы на вершине ребра (3) — семью связями; атомы на вершине (4) — шестью связями.

На следующем этапе адсорбированные атомы под действием ионно-дипольных сил молекул воды подвергаются гидратации:



Вследствие этого, на поверхности металла образуется слой, из которого катионы переходят в травящий раствор (рис. 7.6). Переход атомов в адсорбированный слой является моментом, определяющим скорость процесса.

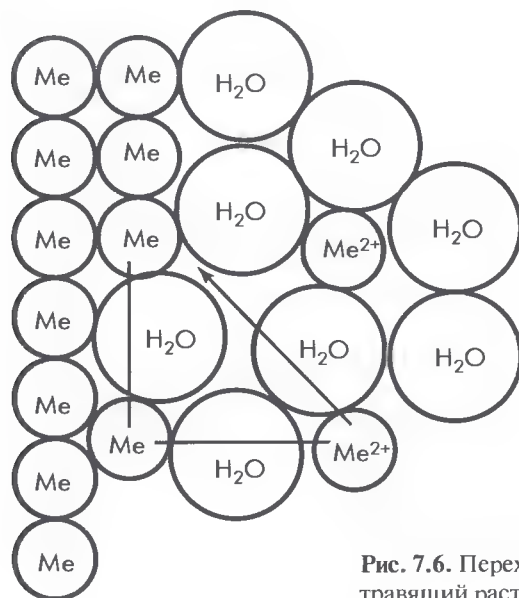


Рис. 7.6. Переход ионов металла в водный травящий раствор

Замедление растворения металла может также происходить вследствие образования *поверхностных слоев*, которые служат барьером для общения травящего раствора и металла. Тонкие, твердые и беспористые окисные слои пассивируют поверхность металла, и травитель не может достигнуть металлической фазы. Иногда вследствие прорыва пассивационной пленки может наблюдаться очень сильное локальное растворение, что крайне нежелательно. Поэтому состояние поверхности травящего металла необходимо приводить к однозначному состоянию, чтобы процессы проходили одинаково на всей поверхности. По этой причине сильные загрязнения необходимо удалять перед травлением, чтобы обеспечить его равномерность.

Физическая и химическая неоднородности могут привести к ускоренному или замедленному растворению металла. Физическая неоднородность определяется различной ориентацией поверхностных кристаллов, а также различными дефектами построения кристаллической решетки и связанной с ними анизотропией большинства физических и химических свойств. Поверхность металла с наибольшей плотностью упаковки атомов является энергетически са-

мой стабильной и травится с минимальной скоростью (рис 7.7, 7.8). Каждый кристалл травится со скоростью, зависящей от его ориентации, поэтому на участках, предназначенных для экспонирования, крупнокристаллическая структура металлических слоев может оказать очень вредное воздействие.

Рис. 7.7. Стадии смешения при травлении металлов, в зависимости от плотности упаковки поверхностных атомов: 1 — поверхность перед травлением; 2 — направление более плотной упаковки атомов; 3 — поверхность после травления; 4 — направление менее плотной упаковки атомов.

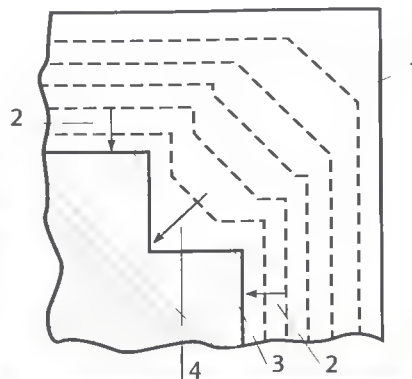


Рис. 7.8. Поверхность алюминия после травления (снимок получен на электронном микроскопе).

Химическая неоднородность определяется границами кристаллов, на которых предпочтительно осаждаются загрязнения и концентрируются дефекты. Если металл химически и/или физически неоднороден, неоднородность его поверхности будет определяться различным химическим составом компонентов поверхности. Химическая неоднородность проявляется через различные локальные химические аномалии в микронном диапазоне в виде образования точечных протравов и рисок. Негативное воздействие физической и химической неоднородностей на качество рисунка, полученного в результате травления, можно предотвратить, если тщательно готовить поверхности предварительным, обезжириванием, растравливанием (микротравлением), механической очисткой. Поэтому еще на стадии получения металлических слоев необходимо обращать внимание на их мелкозернистость, чистоту и бездефектность.

7.3. Травящие растворы в производстве печатных плат

7.3.1. Процессы и параметры травления

Эффективность процесса травления определяется реакциями диффузии, окисления и восстановления, протекающими на границе фаз: металл—раствор и в самом растворе. Ход этих реакций можно регулировать поддержанием заданной температуры и состава травителя. Кроме того, необходимо принимать во внимание сложность рисунка печатной платы, толщину слоя травления, тип защитного покрытия

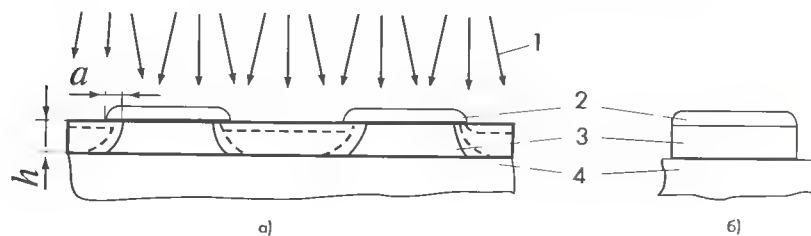


Рис. 7.9. Профили травления: а — травление; б — идеальный профиль; 1 — жидкий травитель; 2 — защитный слой; 3 — профиль проводника; 4 — подложка.

Большое влияние на качество оказывает скорость травления. Обычно для травления металлических слоев она составляет 10—50 мм/мин. Так как травящий раствор постепенно истощается, необходимо постоянно следить за качеством рисунка так, чтобы зазоры между проводниками становились полностью свободными от металла, но чтобы не было перетрава, которое в первую очередь приводит к сильному боковому подтравливанию. Необходимое постоянство скорости травления достигается непрерывной регенерацией раствора и поддержание температуры раствора в необходимых пределах.

Качество травления характеризуется степенью бокового подтравливания рисунка, защищенного резистом. Боковое подтравливание возникает потому, что травитель растворяет металл во всех направлениях: во фронтальном и боковом. При использовании металлорезиста к простому химическому растворению металла добавляется электрохимическое, обусловленное электрохимической разницей потенциалов между покрытием и основой (рис. 7.10). Оно обычно проявляется при слабой интенсивности травления, так как электрохимический подтрав связан только с временем процесса. И чем оно короче, тем меньше электрохимический процесс подтравливания, тем меньше нависание металлорезиста над профилем проводника, тем меньше вероятность обвала кромок металлорезиста, из-за которых может происходить замыкание зазоров между проводниками.

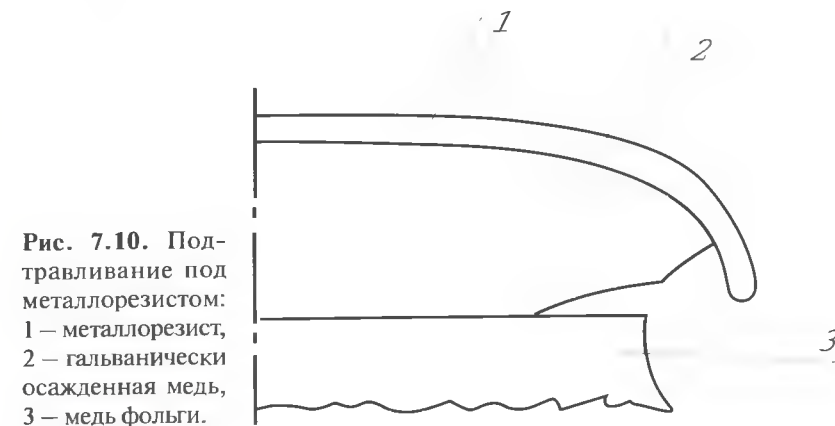


Рис. 7.10. Подтравливание под металлорезистом: 1 — металлорезист, 2 — гальванически осаждаемая медь, 3 — медь фольга.

Степень бокового подтравливания определяется фактором травления, который равен отношению глубины травления (h) в направлении, перпендикулярном поверхности заготовки, к глубине бокового подтравливания (a). Обычно $a/h \leq 0,75$.

Если фактор подтравливания устойчивый, его можно учесть при изготовлении фотшаблонов.

При выборе растворов травления следует учитывать возможность нежелательных реакций с выделением водорода. Его выделения на поверхности травления создают барьер для травителя. Конечно, при струйном травлении этот газовый барьер сбивается с поверхности тугими струями травильного раствора, но если где-либо хотя бы кратковременно, как-то образуются застойные зоны, немедленно образующиеся пузырьки газа приведут к задержке процесса химического растворения. Для предотвращения выделений водорода в состав растворов травления вводят окислители, которые восстанавливают водород с образованием воды, и процесс идет без выделения газов.

Для травления меди и ее сплавов применяют травители на основе хлорида железа (III), персульфата аммония, хлорида меди (II), хромовой кислоты, перекиси водорода и щелочного раствора хлорита натрия. При выборе того или иного травителя, наряду с имеющимися в наличии материалами, необходимо учитывать объем и техническую оснащенность производства, экономичность нейтрализации промстоков, возможности регенерации и извлечения меди. В табл. 7.2 приведены используемые травители и возможности их применения.

7.3.2. Травление в растворе хлорного железа (III)

Хлорид железа (III) благодаря низкой стоимости, универсальности, высокой скорости травления является распространенным травителем в прототипном производстве, когда утилизация отработанных растворов не представляют особых забот. При содержании 500 г/л $FeCl_3$, 4–6% HCl и температуре 35–50°C скорость травления меди составляет 50 мкм/мин. Растворение меди происходит в соответствии с реакцией:

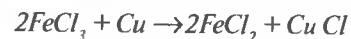


Таблица 7.2. Травители для различных материалов

Травитель	Материал												
	Алюминий (Al) и его сплавы	Свинец (Pb)	Германий (Ge)	Золото (Au)	Железо (Fe) и его сплавы	Медь (Cu) и ее сплавы	Хром (Cr)	Молибден (Mo)	Никель (Ni) и его сплавы	Серебро (Ag)	Кремний (Si)	Цинк (Zn)	Олово (Sn)
Хлорное железо	×	×			×	×			×				×
Серная кислота													×
Соляная кислота	×						×	×			×	×	
Азотная кислота					×		×			×	×		
Соляная и азотная кислоты	×			×				×					
Плавиковая кислота													×
Плавиковая и азотная кислоты			×								×		×
Хромовая кислота							×						
Хромовая и серная кислоты						×			×			×	
Хлорная медь						×							
Персульфат аммония						×			×				
Едкий натрий	×												
Соляная кислота и перекись водорода						×							

Если в этом процессе концентрация меди в растворе составит 80 г/л, то он уже непригоден для дальнейшего использования. Его травящую способность можно ненадолго восстановить за счет подогрева раствора, но при больших концентрациях меди скорость травления настолько падает, что длительное пребывание в растворе приводит к утрате заготовки. Очистка и регенерация отработанного раствора хлорного железа требуют больших затрат. Применяют процесс, основанный на металлической связи меди с железными стружками или железным порошком и окислении оставшегося раствора хлором для перевода $FeCl_2$ в $FeCl_3$.

С раствором хлорного железа хорошо сочетаются кислотостойкие краски трафаретной печати и фоторезисты, а в ряде случаев

металлорезисты на основе золота или серебра. Металлорезисты на основе олова и его сплавов, в частности гальванический сплав олово-свинец, не приемлемы для раствора хлорного железа, так как они в нем неустойчивы.

7.3.3. Травление в персульфате аммония

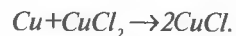
Применение травящих растворов на основе персульфата аммония или персульфата натрия обусловлено его способностью получения четкого профиля, устойчивостью металлорезиста на основе олова, простотой регенерацией и решения проблемы сточных вод. Обычный состав травителя содержит $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 200 г/л и 0,3...0,5% H_2SO_4 . При температуре 40...50°C и струйном травлении скорость травления составляет 10...20 мкм/мин, при травлении погружением — 3...6 мкм/мин. При содержании меди в растворе 30 г/л скорость травления сильно падает. Новыми разработками предусмотрено добавление в качестве катализатора хлорида ртути, при этом травящий раствор содержит 200 г/л $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 1% H_2SO_4 и 0,05% HgCl_2 . При использовании персульфата аммония растворение меди протекает по следующему уравнению:



Регенерация основана на выпадении в осадок соединений меди при глубоком охлаждении или выделением в процессе электролиза. Недостатками раствора персульфата аммония являются опасность образования труднорастворимых медных комплексных соединений и небольшие рабочие концентрации меди.

7.3.4. Травление в кислом растворе хлорида меди (II)

Однозначное преимущество CuCl_2 как травителя, содержащего 150 г/л CuCl_2 и 5% HCl , заключается в возможности полной регенерации в замкнутом цикле. Благодаря этому обеспечивают постоянную скорость травления при неизменной температуре и определенном содержании меди в растворе — 30 г/л. Процесс травления протекает согласно уравнению:



Образующаяся при травлении меди соль CuCl нерастворима в воде и может служить источником засорения фильтров и форсунок в

установках травления. В присутствии ионов хлора от HCl , NH_4Cl , NaCl образуются хорошо растворимые комплексы в виде CuCl_2° .

Свежий раствор травления содержит: CuCl_2 — 100...150 г/л; HCl — 145...150 г/л; $\text{pH} = 0$...%1. Рабочая температура 45...50°C, при этом рабочая плотность раствора 1,07...1,12 г/см³. При составлении раствора (комнатная температура) плотность раствора должна быть 1,28...1,29 г/см³.

При температуре 40...60°C скорость травления составляет примерно 35 мкм в минуту. Емкость раствора 10...20 г/л. Критерием работоспособности раствора служит значение окислительно-восстановительного потенциала (*redox-potential*). Величина *redox-potential* свежеприготовленного раствора составляет примерно 600 мВ. По мере накопления одновалентной меди его *redox-potential* снижается до 200 мВ, травящая способность ослабевает.

В качестве защитных покрытий используют кислотостойкие краски трафаретной печати, фоторезисты и металлорезисты на основе золота и серебра. Металлорезисты на основе олова и его сплавов непригодны.

Окисление образующихся при травлении соединений одновалентной меди можно осуществить различными способами:



окислением перекисью водорода:



Частично хлористую медь окисляет и кислород воздуха в кислой среде:

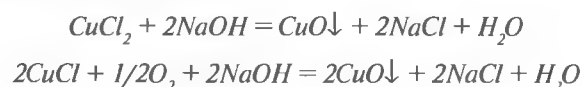


Состояние раствора контролируют по значению *pH*, плотности (*B*) и редокс-потенциалу (*E*). В автоматически управляемых линиях травления дополнительно контролируют уровень раствора и его температуру. Момент регенерации определяют по накоплению меди сверх установленной нормы. Это состояние раствора регистрируется датчиками, когда $E < 400$ мВ, $B > 1,3$ г/л, $\text{pH} = 2$. По сигналу датчиков дозирующие устройства сливают примерно 15% раствора и добавляют HCl до $\text{pH} = 0,4$, H_2O_2 до $E = 600$ мВ, NH_4Cl до уровня, компенсирующего слив раствора.

При ручной коррекции сливают 1/7 часть раствора, подкисляют оставшуюся часть раствора до $pH = 1...2$, добавляя 20...25 г/л HCl . Разбавленную перекись водорода (1:6) вводят в регенерируемый раствор в количестве 110...115 г/л и перемешивают сжатым воздухом 30 мин.

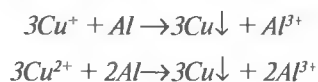
Травящий раствор на основе хлорной меди имеет относительно малую емкость по меди, но лучше других поддается автоматической коррекции, регенерации и нейтрализации. Значительным его преимуществом является возможность полной отмычки плат от остатков компонентов травящего раствора.

Реагентный метод утилизации отработанного раствора хлорной меди состоит в его обработке $NaOH$ и барботажем воздухом (в реакцию входит кислород воздуха):

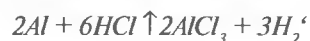


Купрокс CuO после декантации промывают водой, высушивают и сдают в медеплавильное производство.

Извлечение меди из отработанного раствора можно также осуществлять контактным выделением меди на алюминии:



Одновременно остаточная кислота отработанного раствора растворяет алюминий с выделением водорода на тех же поверхностях, что и медь. Это способствует легкому отделению металлической меди от алюминия.



Процесс регенерации состоит в погружении в травильный раствор алюминиевого лома. Восстановленная медь в виде порошка скапливается на дне ванны, а раствор $AlCl_3$ используют в качестве хорошего коагулянта для очистки воды.

Электролизный метод регенерации отработанного меднохлоридного раствора состоит в использовании электролизера с нейтральными (в частности, графитовыми) электродами, разделенными катионитовой мембраной. После охлаждения отработанный раствор подается в анодное пространство электролизера, где часть ионов Cu^+ окисляется до Cu^{2+} . Другая часть проходит мембрану (за счет процесса электродиализа) и на

катоде восстанавливается до металлического состояния Cu^0 . Ионы Cu^{2+} (+ 0,337 В) не могут восстановиться на катоде до Cu^0 , так как им нужен более отрицательный потенциал, нежели для Cu^+ (+ 0,521 В). В электролизере проходит реакция, обратная процессу травления:

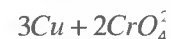


Раствор, обогащенный ионами Cu^{2+} , возвращается в процесс травления.

Электрохимический метод регенерации отработанного раствора можно было бы считать наиболее приемлемым, если бы при определенных обстоятельствах его не сопровождало опасное выделение хлора. Это происходит из-за сдвига в положительную сторону потенциала анода после окисления одновалентной меди в двухвалентную. Тогда потенциал анода становится выше 1,35 В и начинается процесс выделения хлора. Кислород из-за большого перенапряжения на графите практически не выделяется. При малейших признаках появления хлора процесс необходимо немедленно останавливать и использовать противогаз.

7.3.5. Травление в растворе хромовой кислоты

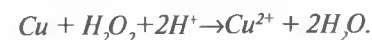
Добавляя к хромовому ангидриду воду, получают необходимую концентрацию хромовой кислоты — 20...30%. Кроме того, добавляют приблизительно 10% H_2SO_4 и Na_2SO_4 . При температуре 40...60°C скорость травления меди равна 30...40 мкм/мин. Реакция травления протекает в соответствии с равенством:



Применение H_2CrO_4 целесообразно для травления в лабораторных условиях фольгированных диэлектриков по металлорезисту на основе олова и его сплавов. Широкому применению этого травителя препятствуют необходимость очистки от очень агрессивных веществ, трудности регенерации и высокая стоимость.

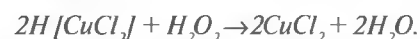
7.3.6. Травление в растворе перекиси водорода

При травлении в растворе перекиси водорода применяются добавки серной или соляной кислоты. В растворе перекиси водорода с серной кислотой (2...8% H_2O_2 и 5...10% H_2SO_4) протекает реакция:



В этом растворе, кроме сульфата меди, не образуется других побочных продуктов. Накопление меди в этом растворе может достигать до 100 г/л. При распылении используемого раствора медь выпадает в осадок в виде сульфата. В качестве защитных покрытий используют кислотостойкие краски трафаретной печати, фоторезисты и металлорезисты на основе золота и серебра.

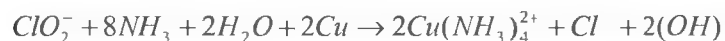
В растворе соляной кислоты перекись водорода обеспечивает непрерывное регенерирование системы, что позволяет осуществлять работу по закрытому циклу:



Простота выделения меди, возможность регенерации и устойчивость практически всех защитных покрытий полимерных и металлических, — преимущества травителей на основе перекиси водорода. Недостатки состоят в необходимости точного контроля ванны, вследствие опасности перекиси водорода, резком росте времени травления при накоплении меди в растворе и химическом разрушении металлических конструкций ванн и оборудования.

7.3.7. Травление в щелочном растворе хлорита натрия

Смесь из NaClO_2 , NH_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ или другой соли аммония и воды при температуре 20...45°C растворяет медь, образуя комплексы:



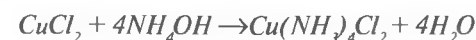
Так как аммиак (NH_3) достаточно летуч, то особое внимание приходится уделять поддержанию необходимой защиты персонала установкой усиленной вытяжки на оборудование травления. Время травления слоя меди толщиной 35 мкм составляет 1 мин, но оно увеличивается с ростом содержания меди в растворе и при содержании меди 40 г/л составляет уже 4 мин. Раствор полностью истощается при содержании меди 50 г/л. Преимущество щелочного раствора хлорита натрия заключается в устойчивости к нему практически всех защитных покрытий. Краски трафаретной печати и фоторезисты не должны быть щелочустойчивыми. Регенерация отработанного

раствора упрощена нейтрализацией — добавлением соляной кислоты, которая переводит растворенную медь в осадок, в виде карбоната или соли, соответствующих применяемому соединению аммиака.

7.3.8 Травление в аммиачном комплексе хлорной меди

Этот процесс был специально создан для травления по металлорезисту на основе олова, в частности по гальваническому эвтектическому сплаву олово-свинец. Последующее осветление (освобождение от окислов) или оплавление олово-свинца позволяло использовать его как хорошее покрытие под пайку.

В аммиачной среде хлорная медь образует аммиачный комплекс хлорной меди:



Этот комплекс является окислителем меди и растворяет ее:



Стандартный состав раствора, г/л:

Аммиачный комплекс хлорной меди (по металлу)	80...100
Аммоний хлористый	40...100
Углекислый аммоний	20...30
Аммиак водный или аммиак жидкий синтетический	5...20
Состав для приготовления аммиачного комплекса $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2$:	
Медь двуххлористая 2-водная —	210...270 г/л
Аммиак водный 25% концентрации —	350...450 мл/л.

При накоплении меди до 60 г/л раствор корректируют. Для этого сливают половину объема отработанного раствора, добавляют в оставшуюся часть NH_4Cl — 115 г/л, доводят водой до рабочего уровня и подают газообразный аммиак до значения $\text{pH} = 8,5...8,8$.

При использовании «блестящего» покрытия олово-свинец нужно иметь ввиду, что его блеск гарантированно сохраняется только при $\text{pH} > 10$. Однако при больших значениях pH возрастает боковое подтравливание. Поэтому оптимальное pH травильного раствора на основе аммиачного комплекса хлорной меди находится в диапазоне 8,5...8,8. При этих значениях pH блеск металлорезиста частично сохраняется.

После травления платы промывают слабым раствором аммиачной воды.

В линиях травления с автоматической корректировкой раствора контролируют температуру, плотность и pH раствора. Окисление Cu^+ в Cu^{2+} происходит непрерывно за счет воздействия кислорода воздуха на распыляющиеся струи раствора в модуле травления:

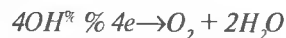


При плотности раствора 1,17 г/см³ система автоматической корректировки включает насос для слива половины отработанного раствора и затем другой насос для подкачки свежего раствора, состоящего из смеси $(NH_4)Cl$ (200 г/л) и $(NH_4)_2CO_3$ (20...30 г/л). При снижении pH до 8,5 система подает в раствор газообразный аммиак или 25%-ный раствор аммиака (500 г/л) до $pH = 8,8$.

Извлечение меди, по мере ее накопления в растворе, производится электролизом в установках, монтируемых около линии травления и связанных с ними в один контур циркуляции раствора. Медь на катоде, из титана или нержавеющей стали, осаждается при плотности тока 30 А/дм² в виде плотного осадка, легко отделяемого от полированной поверхности электрода. Из раствора аммиачного комплекса хлорной меди хлор на графитовом аноде не выделяется, так как он расходуется на окисление NH_3 до азота:



Кроме того потенциал окисления NH_3 до N_2 более отрицателен, чем потенциал выделения хлора. Кроме азота выделяется кислород и, вследствие окисления графита, — углекислый газ:



В лабораторных условиях отработанный раствор подкисляют HCl до $pH = 2$ и засыпают железными стружками. Раствор освобождается от меди за счет реакции замещения. Раствор отделяют от осадка меди декантацией, нейтрализуют известковым молоком до $pH = 6,5...8,5$ и, после отстаивания, сливают в канализацию.

7.3.9. Осветление металлорезиста олово-свинец

Состав раствора, г/л:

Тиомочевина	80...90
Кислота соляная	50...60
Спирт этиловый ректификованный технический	5...6

Для приготовления раствора в две трети объема воды вливают соляную кислоту плотностью 1,19 г/см³, из расчета от 110 до 130 мл на 1 л раствора. В полученный раствор вводят, при перемешивании, расчетные количества тиомочевины и, после ее полного растворения, — этиловый спирт. Затем доводят объем раствора до заданного уровня и перемешивают.

В лабораторных условиях для осветления плату погружают в раствор, покачиванием кюветы инициируют процесс осветления. Время обработки: при 18°C — 1,8 мин; при 25°C — 1,6 мин; при 30°C — 1,0 мин; при 40°C — 0,5 мин; при 45°C — 0,4 мин. Плату промывают проточной горячей водой и затем деионизированной, в крайнем случае, дистиллированной водой..

Лучшие результаты для финишной отмывки получают при отмывке деионизированной водой в ультразвуковой ванне 0,3 мин. Сушить при 40...60°C в течение 3 мин.

Примечание. Если плата была законсервирована или в процессе хранения зажирена, ее поверхность нужно очистить или в спирто-бензиновой смеси в кювете, или в водном растворе технических моющих средств в ультразвуковой ванне. Признак полной отмывки — смачивание поверхности водой без разводов.

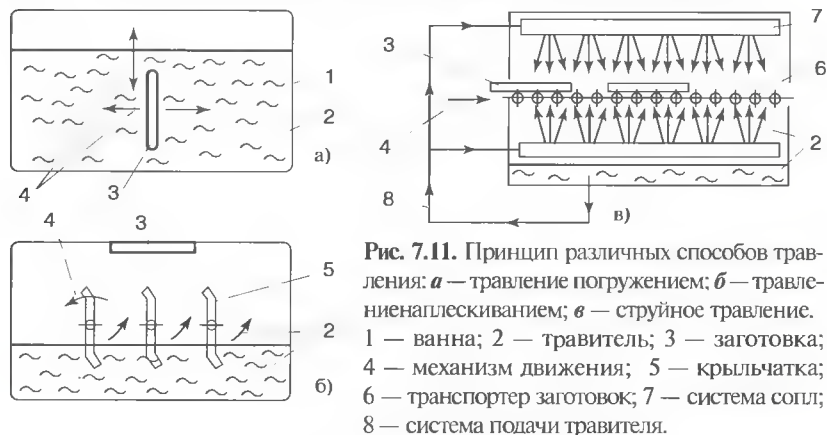
При использовании спирто-бензиновой смеси принять меры противопожарной и санитарно-гигиенической безопасности.

7.4. Техника травления

Процесс травления должен быть организован таким образом, чтобы возможное химическое воздействие травителя на травящийся материал было использовано наиболее оптимально. Установки травления должны выполнять следующие функции:

- обеспечивать интенсивное обновление травящего раствора на поверхности заготовки;
- создавать интенсивное однонаправленное разбрызгивание травителя;
- обеспечивать температурную стабильность раствора;
- обеспечивать постоянство состава травителя (в ряде случаев с регенерацией);
- обеспечивать промывку, нейтрализацию и сушку заготовки;
- обеспечивать непрерывный процесс при массовом производстве.

Различают травильные установки, в которых травление производится различными способами: 1 – погружением (в лабораторных условиях), 2 – травление наплескиванием и струйное травление. На рис. 7.11 показаны принципы различных способов травления.



Наиболее эффективными являются струйные установки травления, в которых заготовка на роликовом транспортере перемещается в камеру травления, после прохождения которой она попадает в камеры для нейтрализации и промывки (рис. 7.12). Такие линии могут продолжаться устройствами для удаления фоторезиста, отмывки и сушки заготовок. Сопла располагаются таким образом, чтобы травящий раствор разбрызгивался под давлением приблизительно 4 кгс/см^2 перпендикулярно поверхности заготовки. Для достижения равномерности травления осуществляют колебание струй с помощью соответствующего движения держателей сопел.

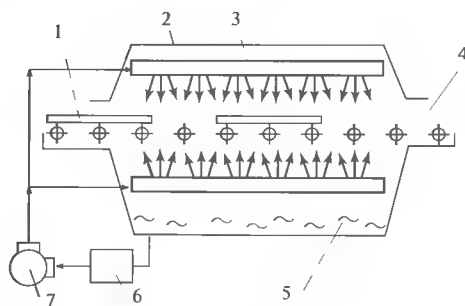


Рис. 7.12. Схема установки струйного травления: 1 – заготовка; 2 – корпус; 3 – разбрызгивающее устройство; 4 – конвейер; 5 – травильный раствор; 6 – регенератор отработанного раствора; 7 – система трубопроводов с насосом.

Струйное травление обеспечивает самую большую скорость травления. Благодаря этому и перпендикулярному направлению струй раствора подтравливание профиля рисунка в этих установках относительно мало.

Особое внимание необходимо обращать на очистку заготовки от остатков травящего раствора. Благодаря интенсивной многократной промывке, нейтрализации и сушке обеспечивают полное удаление остатков травителя. В противном случае, возможны коррозия и ухудшение электрических свойств.

7.5. Профильное травление

Кроме формирования структуры проводников на диэлектрических основаниях при изготовлении печатных плат, травление применяется для формирования из металлических листов фасонных деталей. Преимущества этого метода реализуются в тех случаях, когда конструкции из тонких листовых материалов исключают механическую обработку (небольшие диаметры отверстий, узкие перемычки) или небольшая партия продукции делает нецелесообразным изготовление дорогих приспособлений (вырубных штампов, высечек). Для профильного травления пригодны все материалы, которые можно травить; при этом легко окисляемые материалы проще поддаются обработке, чем, например, благородные металлы. Травители, применяемые для различных металлов, приведены в табл. 7.2.

При изготовлении оригиналов деталей, для профильного травления корректировка размеров, с учетом подтравливания и других погрешностей, намного важнее, чем при изготовлении печатных плат. Так как изготовление размерных деталей и резких контуров при фотохимическом фрезеровании может осуществляться только при условии прочной адгезии фоторезиста с поверхностью заготовки, необходима хорошая подготовка поверхности с созданием легкой шероховатости поверхности материала ($< 7 \text{ мкм}$). Для хорошей адгезии фоторезиста требуется обезжиривание и очистка поверхности травлением. Нанесение фоторезиста может быть одно- и двухсторонним в зависимости от того, определяют ли толщина материала и требования к размерам необходимость одно- или двухстороннего травления. Травление осуществляют в установках травления – кассетах для сбора готовых деталей, не имеющих после травления взаимных связей.

Последним этапом является удаление фоторезиста, которое может быть осуществлено химически, в растворе щелочи или ацетоне. Необходимо принимать во внимание конусообразность профиля отверстий влистевоznикающие в результате естественного подравливания.

7.6. Очистка отверстий после сверления

7.6.1. Причины наволакивания смолы на стенки отверстий

В процессе сверления отверстий, в зоне резания достигаются температуры до 400°С. При выходе сверла на стенках отверстий, а главное, — на торцах контактных площадок внутренних слоев «намазывается» расплавленная смола, мешающая надежному внутреннему электрическому межсоединению (рис. 7.13).

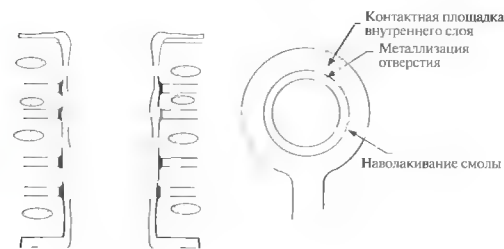


Рис. 7.13. Загрязнение стенок отверстий наволакиванием смолы создает разделительный слой между торцами контактных площадок и металлизацией отверстий.

Метод металлизации сквозных отверстий долгое время оставался ненадежным, пока не была решена проблема очистки отверстий. Из всего разнообразия опробованных методов очистки наиболее приемлемыми считаются: растворение в концентрированной серной кислоте, перманганатная очистка, плазмохимический метод, гидроабразивная очистка, двойное сверление. Попытаемся дать объективную оценку каждому методу по технико-экономическим критериям.

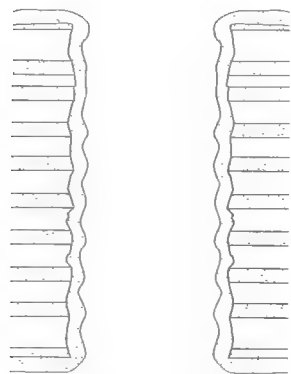


Рис. 7.14. Очищенное от наволакивания смолы отверстие.

7.6.2. Очистка в концентрированной серной кислоте

Грубое удаление эпоксидной смолы и стекловолокна достигается комбинированным действием концентрированной серной и 30%-ной плавиковой кислоты. Серная кислота лучше растворяет связующее основание, чем запекшиеся остатки смолы на торцах контактных площадок. Поэтому для обеспечения хорошей очистки отверстий растворение смолы основания идет настолько глубоко, что высвобождающаяся стеклоткань создает лабиринт, из которого невозможно вымыть остатки растворов. Дополнительное использование плавиковой кислоты позволяет избавиться от стеклянного ворса. При длительном подтачивании обеспечивается трехстороннее освобождение торцев контактных площадок, что способствует упрочнению их связи с металлизацией отверстий. Но при этом возникают следующие неблагоприятные факторы:

- плавиковая кислота оставляет на границе растворения стекла гель, который трудно удалить;
- отработанная плавиковая кислота создает экологические проблемы (соединения фтора не образуют нерастворимый в воде осадок, чтобы их можно было отделить при очистке промстоков);
- при использовании серной кислоты происходит настолько глубокое подтачивание, что создается опасность ухудшения качества изоляции.

К этому нужно добавить экологические проблемы: ион фтора не образует соединений, которые можно было бы отделить от водного раствора. Поэтому реагентная нейтрализация отработанных растворов травления диэлектриков крайне затруднена. Все это заставило изъять из промышленного производства процессы очистки плат в серной и плавиковой кислоте.

7.6.3. Перманганатная очистка

Ее проводят в линиях струйной обработки, по производительности она сочетается с другими аналогичными линиями. Растворение смолы в щелочном растворе перманганата калия производится после обработки заготовки в сильных органических растворителях (40°С, 5 мин) для разрыхления молекулярной структуры смолы, после чего смола поддается растворению (90°С, 10 мин).

Перманганатная очистка мягче травит диэлектрик и не создает глубокого подтачивания. При этом следует выделить следующие неблагоприятные факторы:

- очистка промстоков — эта операция труднореализуемая, но обязательная;
- емкости с щелочным раствором перманганата должны быть выполнены из особого материала, не поддающегося растворению в этом растворе;
- повышенная температура раствора очистки требует использования нагревостойкого материала для рабочих ванн.

Отметим, что этот способ наиболее распространен в производстве за рубежом. При этом за последнее десятилетие там произошла неоднократная смена поколений технологий и оборудования, но перманганатная очистка сохранилась. Её предлагают практически все фирмы, поставляющие оборудование струйной обработки. Особенность такого оборудования состоит в необходимости использования некорродирующих нагревостойких материалов. Это станет понятно из представленной ниже технологии.

Линия перманганатной очистки:

Ванна кондиционирования:

Метилэтилкетон (возможна замена на ацетон)	250 мл/л
Гидроокись натрия	18–20 г/л
Питьевая вода	До литра
Температура	18–25°C
Время обработки	5–10 мин При использовании ацетона — 15–20 мин

Ванна промывки:

Вода питьевая	Кратность обмена — 2 объема в час
Температура	50–60°C
Время промывки	5–6 мин

Ванна очистки:

Перманганат калия	40–50 г/л
Гидроокись калия	35–45 г/л
Вода питьевая	До литра
Температура	70±2°C
Время обработки	15–25 мин

Ванна восстановления:

Натрий надсернистый	35 г/л
Серная кислота	15–20 мл/л
Вода питьевая	До 1 л
Температура	18–25°C
Время обработки	7–10 мин

Ванна промывки:

Вода питьевая	Кратность обмена — 2 объема в час
Температура	50–60°C
Время промывки	5–6 мин

7.6.4. Плазмохимическая очистка

В отличие от химических методов очистки отверстий, сухое плазменное травление не создает экологических проблем. К тому же оно обеспечивает хорошую адгезию в коротком цикле обработки.

В качестве реагента используется низкотемпературная плазма из смеси активных газов, например, кислорода и фреона. Плазма превращает эпоксидную смолу в летучие компоненты, удаляемые из отверстий. Для очистки, платы помещаются в вакуумную камеру, где они размещаются между электродами, создается высокочастотное электрическое поле с частотой 15 МГц, мощностью в несколько киловатт. Наполняющие камеру газы возбуждаются электрическим полем до образования плазмы, которая собственно и растворяет тонкие слои смолы в отверстиях. Продукты этой реакции уходят в атмосферу. После снятия напряжения смесь газов возвращается в нейтральное состояние и не представляет особой опасности для окружающей среды. После обработки плазмой заготовки плат остаются сухими и чистыми.

Этот метод очень эффективен для очистки отверстий, однако:

- процесс плазмохимической очистки — пульсирующий (не точный);
- оборудование для этого метода (вакуумная камера, СВЧ-генератор, системы вакуумного отсоса и впуска газов, газобаллонное хозяйство с заботами по регулярной поставке газов) слишком дорогое, что делает его трудно доступным для российских производителей МПП;
- процесс плазмохимической очистки требует дополнительных операций по очистке отверстий от пепла и устранения электростатических накоплений зарядов.

7.6.5. Гидроабразивная очистка

Этот дорогой в эксплуатации метод возможен при наличии на предприятии мощной компрессорной станции. Он не только эффективно очищает отверстия, но и создает очень хорошую шероховатость на поверхности фольги. Для очистки отверстий используют водяную пульпу с абразивным порошком, которую с большой скоростью с двух сторон направляют на заготовку. Кинетическую энергию пульпы создает сжатый воздух под давлением не менее 0,5 МПа (5 атм). В качестве абразива используется электрокорундовый порошок, смешиваемый с водой в сифоне, в соотношении 1:4. Покачивание форсунок, из которых извергаются струи пульпы, создает равномерность обработки поверхности заготовки и увеличивает гарантии обработки всех отверстий без пропуска. Поверхность фольги после гидроабразивной обработки получает ровный матовый вид. Поскольку эта обработка снимает микронный слой меди с фольги, активация ее поверхности достигается с лучшим эффектом.

Однако в последнее время этот процесс потерял актуальность из-за принципиальной неспособности чистить отверстия малого диаметра (до 0,3 мм) и больших издержек при эксплуатации. Большой расход сжатого воздуха (до 400 л/мин), из-за которого приходится эксплуатировать и обслуживать мощный компрессор, не создает ему и технико-экономических преимуществ.

7.6.6. Двойное сверление

В данном случае подразумевается сверление отверстия дважды, второй раз сверлом с припуском на 0,1 мм. Поскольку при повторном сверлении энергия разрушения стенок гораздо меньше, температуры в зоне резания не настолько большие, чтобы вызвать расплавление смолы и размазывание ее на торцах контактных площадок. Для получения нужного эффекта при повторном сверлении нужно, чтобы оборудование обеспечивало высокую позиционную повторяемость. Повторное сверление необходимо проводить, не меняя положения заготовки. При этом добиться высокой повторяемости почти невозможно. По этой причине на некоторой части отверстия все же будут оставаться продукты сверления. Соединение металлизации с торцами внутренних слоев будет происходить не по полной окружности. Несмотря на это, часть очищенного повторным сверлением отверстия будет иметь устойчивый контакт с внутренними слоями.

ЛИТЕРАТУРА

1. AO CSR 259040 "Zarizeni pro kontrolu elektrickych spojeni".
2. Coombs' Printed Circuits Handbook/ Fifth Edition/ McGraw-Hill HandBooks, 2001.
3. Dukes J. M. C. Printed Circuits. Their Design and Application. — London: Macdonald.
4. Larry W. Burgess. Material Matters. Circuitree, December 2001.
5. Modern registration multileayer system. — www.printprocess.com
6. New Advances in Printed Circuits. Proc. Of the First Technical Symposium on Printed Circuits, October 1947; NBS, Miscellaneous Publ. № 192, November 1948.
7. Patentschrift DD 246691 A3 "Einrichtung zur Kontrolle elektrischer Verbindungen".
8. www.pcbfab.ru
9. А.с. СССР №1081569 «Устройство для контроля электрических соединений».
10. Белевцев А. Т. и др. Печатные схемы в приборостроении, вычислительной технике и автоматике. — М.: Машиностроение, 1972, — с.152.
11. Британский патент № 4681 (1903). Автор — А. Hansen. Резиновые кабели с проводниками, полученными гальваническим или механическим осаждением.
12. Британский патент № 14699 (1913). Автор — А. Barry. Зигзагообразный нагревательный элемент, изготавливаемый избирательным травлением металлической фольги на диэлектрическом основании.
13. Британский патент № 267172 (1926). Автор — Paragon Rubber Manufacturing Co. Печатные схемы на изоляционном основании, полученные тиснением металлической фольги, заполнением рельефа низкоплавким металлом, распылением металла, электролитическим осаждением с применением трафаретной печати.
14. Будневич М. Технологическая подготовка производства печатных плат. — Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2004, №5.
15. Галецкий Ф.П. Производство печатных плат. Современные технологии. — Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1998, №2.
16. Галецкий Ф.П. Способ изготовления многослойных печатных плат. А.С. СССР № 970737, 1982.
17. Грачева Л. Новое в «сухих» технологиях печатных плат. — Компоненты и технологии, 2002, №9.
18. Ивлев В. Вероятностные методы в конструировании и производстве многослойных печатных плат. — Свердловск: Уральский политехнический институт, 1989.
19. Ильин В. Химические и электрохимические процессы в производстве печатных плат. — М.: Гальванотехника и обработка поверхности, приложение, 1994, выпуск 2.
20. Кокотов В.З. Конструкции, технология и автоматизирование проектирование рельефного монтажа. Учебное пособие. — М.: МАИ, 1998. — 96 с.
21. Кокотов В., Сычева Е. САПР рельефного монтажа. — www.kis.pcweek.ru/N11/CP1251/Sapir/chapt2.html
22. Ласкин А. Технология LaserGraver — шаблоны печатных плат за один технологический этап. — Компоненты и технологии, 2003, №1.

23. Медведев А. Надежность и контроль качества печатного монтажа. — М.: Радио и связь. 1986.
24. Медведев А. «Сухой» метод изготовления печатных плат. — Компоненты и технологии. 2001, №7.
25. Медведев А. Технология печатных плат. Эволюция или революция? — Компоненты и технологии, 2001, №5.
26. Медведев А. «Productronica-2001». Первые впечатления. — Компоненты и технологии, 2001, №8; 2002, №1.
27. Медведев А. Технология печатных плат. Куда идти? — Электронные компоненты. 2002, №3.
28. Медведев А. Оборудование для производства печатных плат. — Электронные компоненты, 2002, №3.
29. Новокрещенов С. Коробление многослойных печатных плат. — Электронные компоненты, 2004, №2.
30. НПО «Рубикон-Инновация». Что такое рельефные платы? — www.keytown.com/users/rubicon/index.html
31. Пирогова Е. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. — М.: ФОРУМ ИНФРА-М. 2005. — 560 с. (Высшее образование).
32. Системы совмещения при производстве МПП и экспонировании. — www.petgoc.com.ru/index.asp
33. Семенов П. Снайпер или автомат? Прецизионная система совмещения в производстве многослойных печатных плат. — Компоненты и технологии, 2002, №3.
34. Федулова А., Котов Е., Явич Э. Многослойные печатные платы. — М.: Сов. Радио, 1977.
35. Ильин В. Технология изготовления печатных плат. — Л.: Машиностроение, 1984.
36. Федулова А. и др. Технология многослойных печатных плат. — М.: Радио и связь, 1990.
37. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. — М.: Сов. Радио, 1968.
38. Цветков Ю., Тахаудинов Р., Городов В. Моделирование совмещаемости многослойных печатных плат. — Электронные компоненты, 2004, №5.

ЭЛЕКТРОНИКА НА УКАХ ТЕХНОЛОГИЯ БИЗНЕС

- Журнал выпускается с февраля 1996 года, периодичность — восемь номеров в год, тираж — 17 тыс. экз. Это единственное в России и странах СНГ издание, комплексно освещающее все основные направления ЭЛЕКТРОНИКИ, понимаемой в широком смысле, как принято в мировой практике: от технологии и компонентов до приборов и радиоэлектронных систем военного, гражданского и бытового назначения.
- Журнал независим от чьих-либо личных, корпоративных и ведомственных интересов, в чем находит поддержку спонсоров и читателей.
- В составе Редакционного Совета журнала — ведущие ученые и специалисты в различных областях электроники, в том числе академики и члены-корреспонденты РАН, руководители предприятий и фирм различных форм собственности.

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

- Связь и телекоммуникации
- Компьютерная и информационная техника
- Элементная база электроники
- Контроль и измерения
- Бытовая электроника
- Средства отображения информации
- Промышленная электроника
- Электроника для ТЭК
- Системы навигации
- Печатные платы
- Оптоэлектроника
- Медицинская техника
- Электроника и экология
- Системы безопасности
- Новые технологии
- Экономика + бизнес
- Военная электроника
- Электроника для транспорта
- Системы проектирования
- Средства отображения информации
- Управление качеством
- Выставки
- Книжные новинки

НАШ АДРЕС:

125319, г. Москва, а/я 594.
 ЗАО «РИЦ «Техносфера»
 Телефон: (095) 234-0110
 Факс: (095) 956-3346
 E-mail: journal@electronics.ru
 Http://www.electronics.ru

ПОДПИСКА

- по каталогу «Газеты и журналы» агентства «Роспечать», индексы:
71775 — полугодовой индекс
47299 — годовой индекс
- в объединенном каталоге «Пресса России»
26037 — полугодовой индекс
- в ООО «Вся пресса»
 по тел.: (095) 257-9980
- в редакции журнала
 по тел.: (095) 234-0110

Телефон издательства:
(095) 234 01 10

А. Медведев
Печатные платы.
Конструкции и материалы

Компьютерная верстка — Г.В. Зайцева
Дизайн книжных серий — С.Ю. Биричев
Технический редактор — П.Г. Агафонов
Ответственный за выпуск — Л.Ф. Соловейчик
Идея серии книг по печатным платформам,
монтажу и сборке — Т.Н. Палеева

Формат 60х90/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 19. Тираж 5000 экз. Зак. № 3318.
Бумага офсет №1, плотность 80г/м²

Издательство «Техносфера»
Москва, ул. Тверская, дом 10 строение 3

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»
Отпечатано на ГУРПП
г. Ржев, ул. Урицкого, дом 91

[illegible]

мир
электроники



А. МЕДВЕДЕВ

Печатные платы.
Конструкции
и материалы



ТЕХНОСФЕРА

ISBN 5-34836-026-1



785948 360263